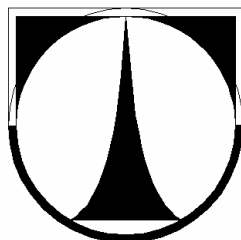


**Technická univerzita v Liberci**

Fakulta strojní



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2007

Jan Koudelka

# **Technická univerzita v Liberci**

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program:

strojírenská technologie

Zaměření:

obrábění a montáž

## **STUDIE VLIVU KONEČNÉHO OPRACOVÁNÍ A VELIKOSTI TOLERANCE DVOJICE ŠOUPÁTKO – POUZDRO NA VELIKOST SVODOVÉ PROPUSTNOSTI ROZVÁDĚČŮ**

### **STUDY OF INFLUENCE FINAL CUTTING AND SIZE EFFECT TOLERANTION OF PAIR SLIDE VALVE – CASE ON SIZE EFFECT VALVES LEAKAGE**

**KOM - 1064**

*Jan Koudelka*

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Jersák, Csc.

Konzultanti: Doc. Ing. Josef Cerha, Csc.

Ing. Jiří Karásek

Ing. František Budárek, Ph.D., Argo-Hytos, a.s. Vrchlabí

Počet stran: 64

Počet tabulek: 11

Počet obrázků: 51

Počet příloh: 3

22.05.2007



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

Katedra obrábění a montáže

Studijní rok : 2006 / 2007

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení : **Jan K O U D E L K A**

Studijní program : M2301 Strojní inženýrství

Studijní obor a zaměření : 2303T002 Strojírenská technologie  
- obrábění a montáž

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

**Studie vlivu konečného opracování a velikosti tolerance dvojice šoupátko pouzdro na velikost svodové propustnosti rozváděčů**

### **Zásady pro vypracování :**

1. Rozbor stávajícího stavu. Stávající tolerance a geometrická přesnost dvojice šoupátko - pouzdro v souvislosti se starou a nově zavedenou technologií konečného opracování (přesné broušení a honování) ve firmě ARGO-HYTOS, a. s. Vrchlabí.
2. Teoretický rozbor vlivu geometrie uložení, tolerance, překrytí hran, viskozity a teploty na velikost svodové propustnosti.
3. Návrh možných opatření v souvislosti s používanými dokončovacími operacemi obrábění.
4. Experimentální ověření předloženého návrhu.
5. Technickoekonomické zhodnocení.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva : 50 - 60 stran textu
- grafické práce : obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu) :

1. CERHA, J.: Hydraulické a pneumatické mechanismy. 1. vydání. TU Liberec 2006
2. IVANTYŠYN, J.: Hydrostatické a pneumatické mechanismy. 1. vydání. SVŠT Bratislava 1982
3. KONEČNÝ, F.: Kótování a tolerování vyměnitelných součástí. SNTL Praha 1965
4. KOL. autorů: Příručka obrábění. AB Sandvik Coromant, Praha 1997

Vedoucí diplomové práce :

doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Josef Cerha, CSc.

Ing. Jiří Karásek

Ing. František Budárek, Ph.D., Argo Hytos,a.s. Vrchlabí

Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.  
vedoucí katedry



Doc. Ing. Petr Lóuda, CSc.  
děkan

V Liberci, dne 28. 2. 2007

**Studie vlivu konečného opracování a velikosti tolerance dvojice šoupátko-pouzdro  
na velikost svodové propustnosti rozváděčů**

**ANOTACE:**

V rešeršní části této práce jsou uvedeny základní informace o rozváděčích a o technologických parametrech kruhovitosti a válcovitosti.

Experimentální část je věnována vlivu konečného opracování a velikosti uložení šoupátka v tělese na objemové ztráty a hydrodynamické síly.

V závěru jsou zhodnoceny výsledky dosažené při experimentech a návrh opatření.

**Study of influence final cutting and size effect toleration of pair slide valve – case  
on size effect valves leakage**

**ANNOTATION:**

In retrieval part of this work are introduced basic theoretic information about valves and about technological parameters of circularity and cylinder deviation.

Experimental part is devoted to the influence of final cutting and size effect of the slide valve in the case on leakages and hydro dynamical forces.

At the close, there are reviewed results reached during experiments and proposal procuration.

**Klíčová slova: ROZVÁDĚČ, KRUHOVITOST, VÁLCOVITOST, OBJEMOVÉ  
ZTRÁTY, HYDRODYNAMICKÉ SÍLY**

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2007

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 64

Počet tabulek: 11

Počet obrázků: 51

Počet příloh: 3

## **MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce a konzultantů.

V Liberci dne 22.05. 2007

Podpis:.....

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Janu Jersákovi, Csc. a konzultantům Ing. Jiřímu Karáskovi, Doc. Ing. Josefu Cerhovi, Csc. za cenné rady.

Poděkování patří rovněž řediteli fy ARGO-HYTOS, a.s. Ing. Františku Veselému za umožnění realizace diplomové práce ve firmě, odborný dohled a podnětné návrhy k práci.

Ve firmě dále děkuji pracovníkům oddělení konstrukce ventilů pod vedením Ing. Tomáše Vatrasy za vstřícnost a rady, které mi byly z jejich strany poskytnuty, technologovi Ing. Františku Budárkovi, Ph.D. za informace o výrobě a výrobních zařízeních, Josefu Bucharovi z prototypové dílny za ochotu při přípravě vzorků pro experimentální část diplomové práce, Ladislavu Mikulcovi a Jaroslavu Smolíkovi z metrologické laboratoře a Ing. Slavomíru Nesvadbovi ze zkušebny za rady a odborný dohled nad měřením.

Speciální poděkování patří mým rodičům a přítelkyni Martině, kteří mi byly oporou během celého mého studia.

Jan Koudelka

**OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
1.1	FIRMA ARGO-HYTOS, A.S. ....	9
1.2	VÝROBKY FIRMY .....	10
<b>2</b>	<b>REŠERŠNÍ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
2.1	ROZVÁDĚČE .....	12
2.1.1	Šoupátkové rozváděče .....	14
2.1.2	Vlastnosti a hlavní parametry rozváděčů .....	16
2.1.3	Ztrátový průtok šoupátkem v neutrální poloze .....	18
2.1.4	Síly působící na šoupátko rozváděče .....	21
2.2	ROZMĚROVÁ ANALÝZA .....	28
2.2.1	Uložení s vůlí .....	28
2.2.2	Geometrické tolerance vztahující se k jednomu prvku .....	30
2.2.2.1	Tolerance kruhovitosti .....	30
2.2.2.2	Tolerance válcovitosti .....	32
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>34</b>
3.1	ROZBOR STÁVAJÍCÍHO STAVU .....	34
3.1.1	Výroba tělesa rozváděče RPE4-10 .....	34
3.1.2	Výroba šoupátka rozváděče RPE4-10 .....	35
3.2	OPATŘENÍ PRO SNÍŽENÍ SVODOVÉ PROPUSTNOSTI .....	36
3.3	REALIZACE MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENU .....	39
3.3.1	Měření úchylek tvaru .....	39
3.3.1.1	Měření úchylek kruhovitosti .....	40
3.3.1.2	Měření úchylek válcovitosti .....	41
3.3.1.3	Měření úchylek profilu podélného řezu .....	42
3.3.1.4	Naměřené hodnoty .....	43
3.3.2	Měření objemových ztrát .....	48
3.3.2.1	Naměřené hodnoty .....	50
3.3.3	Měření hydrodynamických sil .....	56
3.3.3.1	Naměřené hodnoty .....	58
<b>4</b>	<b>POROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A EXPERIMENTÁLNÍCH HODNOT .....</b>	<b>59</b>
4.1	OBJEMOVÉ ZTRÁTY .....	59
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>64</b>



## Seznam použitých zkratk a symbolů

### zkratka

symbol	jednotka	popis
$Al_2 O_3$		umělý korund
$\mu$	[-]	průtokový součinitel
$A, B$		cesty pro připojení spotřebiče, motoru
$CBN$		kubický nitrid bóru
$CNC$		počítačové číslicové řízení
$D$	[m]	průměr šoupátka
$d_{max}$	[mm]	maximální průměr
$d_{min}$	[mm]	minimální průměr
$e$	[m]	excentricita
$F_a$	[N]	zrychlující síla
$F_b$	[N]	síla pasivních odporů
$F_p$	[N]	síla pružiny
$F_{po}$	[kg]	předpětí pružiny
$F_{ux}, F_{dx}$	[N]	hydrodynamické síly
$k$	[N/m]	tuhost pružiny
$L$		cesta pro připojení odpadní větve, odvod ztrátového průtoku
$LML$	[mm]	horní mezní rozměr díry
$lml$	[mm]	dolní mezní rozměr hřídele
$m$	[kg]	hmotnost
$MML$	[mm]	dolní mezní rozměr díry
$mml$	[mm]	horní mezní rozměr hřídele
$P$		cesta pro připojení tlakové větve, případně zdroje
$p_p$	[Pa]	vstupní tlak
$p_s$	[Pa]	tlakový spád
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	průtočné množství
$Q_c$	[m <sup>3</sup> /s]	ztrátový průtok
$S$	[m <sup>2</sup> ]	průřez
$S_m, S^m$	[m]	minimální, maximální vůle
$T$		cesta pro připojení nízkotlaké větve nebo vedení k nádrži
$v$	[m]	vůle
$v$	[m/s]	rychlost proudící tekutiny
$x$	[m]	zdvih šoupátka
$X, Y$		cesty pro připojení řídicích signálů.
$x_0$	[m]	překrytí šoupátka
$\alpha$	[-]	součinitel kontrakce proudu tekutiny
$\Delta$	[mm]	rozměrová úchylka
$\Delta r$	[m]	funkční vůle
$\eta$	[Pa·s]	dynamická viskozita
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$\ddot{x}$	[m/s <sup>2</sup> ]	zrychlení šoupátka
$\dot{x}$	[m/s]	rychlost pohybu šoupátka
$\bar{S}$	[mm]	střední hodnota vůle

# 1 ÚVOD

Tato práce je zaměřena na vliv konečného opracování a velikosti tolerance uložení šoupátka v tělese, na objemové ztráty rozváděče *RPE4-10* firmy ARGO-HYTOS, a.s. Vrchlabí. Jsou zde zkoumány vlivy různých vůlí, geometrických úchylek tvaru a různých technologií broušení.

V rešeršní části jsou uvedeny základní informace o rozváděčích, jejich funkce, rozdělení, vlastnosti a hlavní parametry. Jsou zde uvedeny informace o ztrátových průtocích a silách působících na rozváděče. Součástí rešerše je rozměrová analýza, která popisuje uložení s vůlí a geometrické tolerance kruhovitosti a válcovitosti.

V experimentální části je popsána příprava a výroba vzorků dvou hlavních částí rozváděče, tělesa a šoupátka. Jsou zde uvedeny technologie broušení mezi hroty na konvenční brusce *BUA 20*, CNC brusce *STUDER* a bezhroté brusce *JUPITER 500*. Je zde popsáno měření úchylek tvaru na kruhoměru *FAG FMS 2100* a měření objemových ztrát a hydrodynamických sil. Výsledky měření jsou shrnuty vždy ke konci příslušné kapitoly.

Závěrem této práce je zhodnocení naměřených hodnot, které jsou porovnány s teoretickými vztahy. Je zde i zhodnocení jednotlivých technologií z pohledu přesnosti a sériovosti.

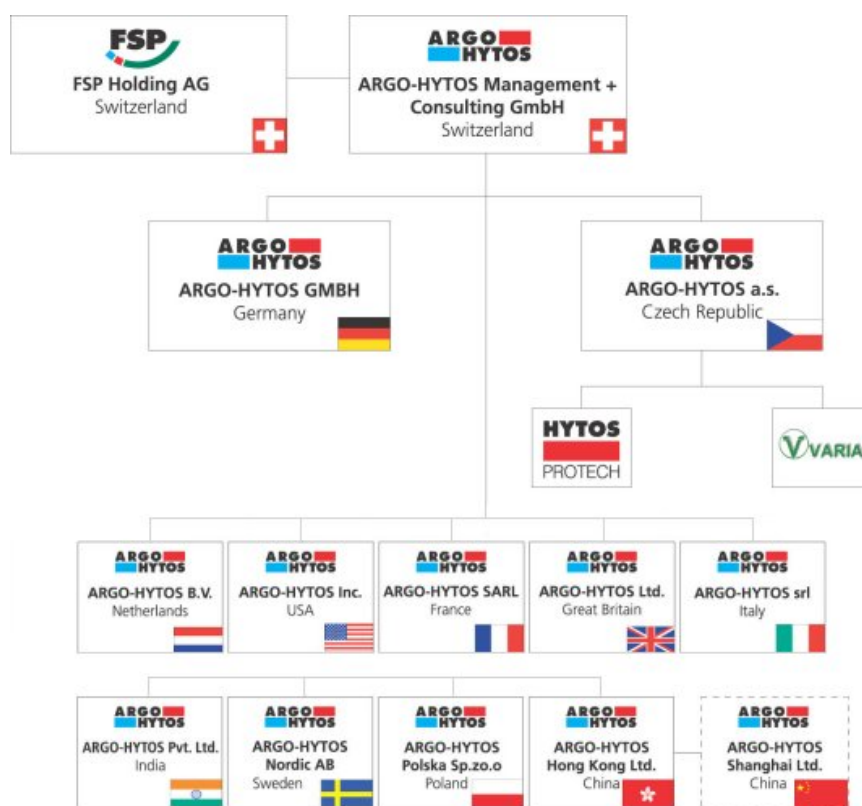
## 1.1 Firma ARGO-HYTOS, a.s.

V období přibývajících komplexních technických dotazů záleží na partnerech systému, kteří komplexně myslí a kteří přinášejí do projektu fundované zkušenosti. V oblasti průmyslových a mobilních hydraulických systémů se přitom objevují stále znovu dvě jména: ARGO a HYTOS. Tyto firmy jsou zárukou inteligentních systémových řešení, která vždy přinášejí do moderní hydrauliky nové impulsy.

ARGO má více než 50 let zkušeností ve filtraci hydraulických kapalin. Zvláště v mobilní hydraulice získal podnik se sídlem v Kraichtalu, v Německu, vedoucí místo na trhu.

HYTOS je specialistou v řídicí a regulační technice. Rovněž přes 50 let existující podnik se sídlem ve Vrchlabí, v České republice, patří celosvětově k vedoucím výrobcům hydraulických prvků a systémů pro průmyslovou a mobilní hydrauliku.

Pod názvem ARGO-HYTOS vytváří nyní oba podniky silného systémového partnera, hnaného kupředu inovační silou 900 spolupracovníků ve dvou výrobních závodech a četnými mezinárodními prodejními společnostmi [1].



Obr. 1. Organizace firmy ARGO-HYTOS [1]

## 1.2 Výrobky firmy

### Filtrační technika

Hlavní kompetencí podniku ARGO-HYTOS v oblasti filtrační techniky jsou náročná řešení, která se používají především v převodech a hydraulických a mazacích systémech. Paleta realizací sahá od stacionárních průmyslových zařízeních až k mobilním použitím.

Ústředním bodem aktivit podniku ARGO-HYTOS jsou především individuálně koncipované filtry a řešení systémů, která jsou přesně přizpůsobena požadavkům zákazníka. Přitom dostává zákazník know-how vedoucího specialisty v oblasti technologie a využívá zkušenosti z četných vývojových projektů z nejrůznějších odvětví.

Vedle specifických zákaznických vývojů nabízí ARGO-HYTOS také obsáhlý program inovačních standardních řešení, která pokrývají široké spektrum použití:

- Sací filtry,
- Zpětné a zpětné-sací filtry,
- Tlakové a vysokotlaké filtry,
- Plnicí a zavzdušňovací filtry,
- Příslušenství filtrů.

### Systém údržby kapalin

Efektivní management hydrauliky nejen snižuje náklady na obsluhu a údržbu, nýbrž přispívá také v rozhodující míře ke zvyšování dostupnosti, produktivity a hospodárnosti technických zařízení. ARGO-HYTOS dodává výrobky pro manuální a automatické čištění hydraulických kapalin:

- Plnicí agregáty,
- Přenosné a stacionární filtrační přístroje pro filtraci ve vedlejším okruhu,
- Systémy pro servis olejů s monitorováním čistoty pomocí čítačů částic,
- Odvodňovací systémy.

### **Senzory a měřicí technika**

Důraz je kladen na systémy, které dovolují spolehlivé posouzení stavu hydraulických kapalin.

Senzory a měřicí technika ARGO-HYTOS jsou zaměřeny přesně na toto spektrum úloh. Zahrnují přístroje a řešení systémů, která umožňují jak monitorování on-line při probíhajícím provozu, tak i analýzu vzorků z láhví za laboratorních podmínek.

- Stacionární monitory částic,
- Přenosné přístroje pro diagnózu olejů,
- Software pro vyhodnocení dat a analýzu trendů.

### **Řídicí a regulační technika**

Kompetentnost podniku ARGO-HYTOS v oblasti řízení a regulace hydraulických systémů je výsledkem více než padesátiletých zkušeností. Základem aplikací je široký výrobní program ventilů, agregátů a řídicích bloků ve všech běžných provedeních a způsobech činnosti, jakož i proporcionální ventily a k nim příslušné řídicí elektroniky:

- Ventily pro montáž na panel - škrťací, tlakové a jednosměrné ventily světlosti 04 až 10,
- Přímé řízené rozváděče světlosti 04 až 10 a nepřímé řízené rozváděče světlosti 16 až 25,
- Vestavné ventily,
- Přímé řízené proporcionální ventily s možností a bez možnosti polohové zpětné vazby ve světlostech 04 až 10,
- Analogová a digitální řídicí elektronika pro umístění na ventil nebo do skříňového rozváděče,
- Stavebnice agregátů,
- Řídicí bloky dle požadavků zákazníka.

Zvláštní důraz je kladen na vývoj specifických zákaznických řešení, která jsou založena na osvědčených technologiích a záměrně přizpůsobena příslušnému profilu požadavků [1].

## 2 REŠERŠNÍ ČÁST

Tato kapitola je zaměřena na základní informace o rozváděčích, uložení s vůlí a o geometrických úchylnkách kruhovitosti a válcovitosti.

### 2.1 Rozváděče

Rozváděče jsou nejčastěji vyráběnými a používanými prvky, neboť z pohledu funkce, způsobů ovládání, jejich kombinací a výkonových stupňů skýtají velké množství variant. Pomocí rozváděčů hradíme nebo měníme směr průtoku, např. zastavujeme motor v požadované poloze a měníme smysl jeho pohybu atd.

Rozváděče jsou z pohledu statického chování diskrétní prvky. Zaujímají konečný počet pracovních poloh (stabilních stavů), ve kterých propojují určitým, jednoznačným způsobem vstupní a výstupní cesty [2].

Rozváděče se proto dělí podle počtu cest na:

- dvoucestné,
- třícestné,
- čtyřcestné a vícecestné,

podle počtu poloh na:

- dvoupolohové,
- třípolohové a vícepolohové,

podle řídicího elementu na:

- šoupátkové,
- sedlové,

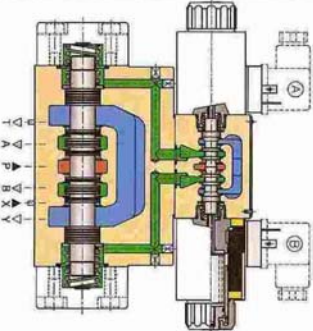
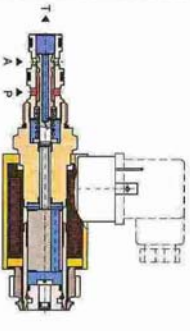
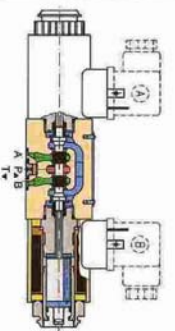
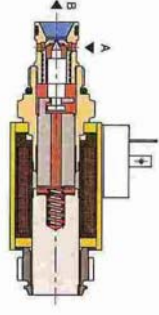
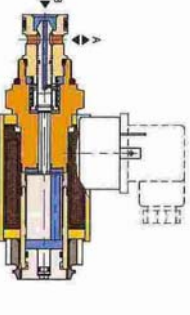
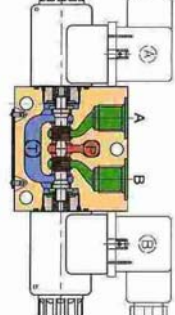
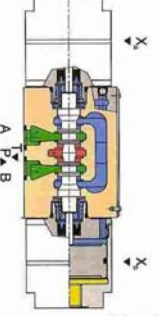
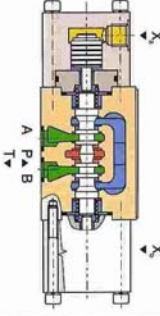
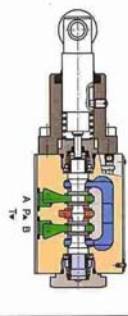
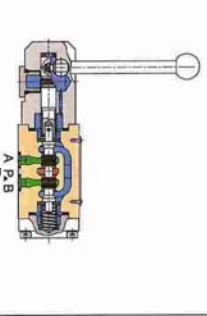
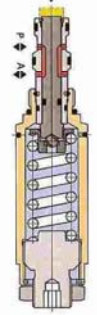
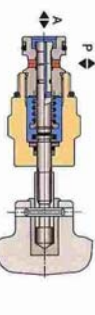
podle ovládání na:

- elektromagneticky ovládané,
- ručně a mechanicky ovládané,
- hydraulicky a pneumaticky ovládané,

podle způsobu připojení na:

- modulové,
- sekční,
- vestavěné.

Jednotlivé typy jsou shrnuty v *obr. 2*.

Elektromagnetické			
Nepřímohřízené šoupátkové	Vestavné šoupátkové	Modulové šoupátkové	
			
Nepřímohřízené sedlové	Vestavné sedlové	Modulové sekční	
			
Pneumatické	Hydraulické	Mechanické	Ruční
Modulové šoupátkové	Modulové šoupátkové	Modulové šoupátkové	Modulové šoupátkové
			
	Vestavné šoupátkové		Vestavné šoupátkové
			

Obr. 2. Rozdělení rozváděčů [8]

Ve schématické značce (symbolu) rozváděče odpovídá počet políček počtu pracovních poloh a v každému políčku je stejný počet cest, označených písmeny, která značí:

- P cesta pro připojení tlakové větve, případně zdroje,
- T cesta pro připojení nízkotlaké větve nebo vedení k nádrži,
- A, B cesty pro připojení spotřebiče, motoru,
- L cesta pro připojení odpadní větve, odvod ztrátového průtoku,
- X, Y cesty pro připojení řídicích signálů.

Tab. 1. Základní znaky rozváděčů [2]

ROZVÁDĚČ	
symbol	popis
	dvoucestný dvoupolohový 2/2
	třícestný dvoupolohový 3/2
	čtyřcestný třípolohový 4/3

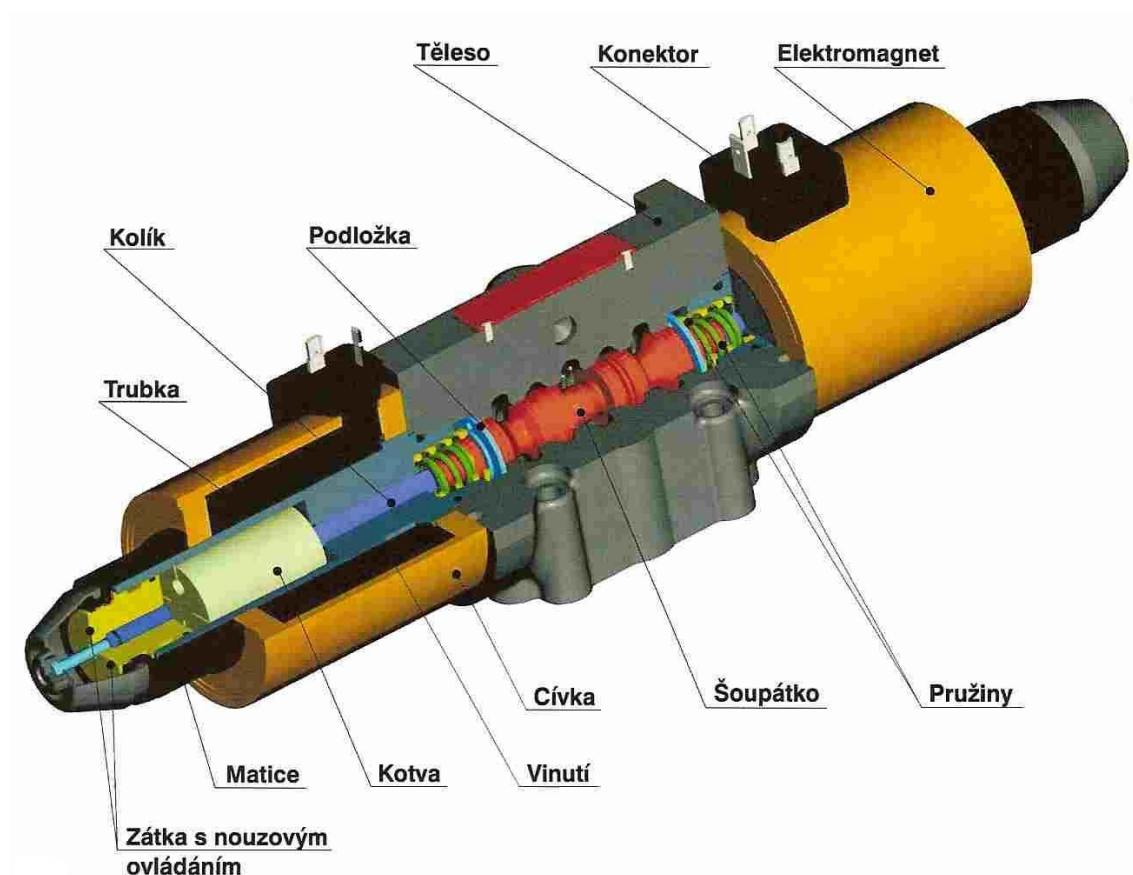
Základní znaky rozváděčů, tak jak byly popsány, jsou souhrnně uvedeny v *tab. 1*. Ve schématech obvodů se rozváděče kreslí vždy v základní poloze. U třípolohových rozváděčů je to poloha střední - neutrální, zpravidla daná středícími pružinami. U dvoupolohových rozváděčů to může být kterákoliv z obou pracovních poloh.

V této práci se zaměřím na šoupátkový rozváděč *RPE4-10* fy ARGO-HYTOS, a.s., proto si tuto kategorii rozváděčů blíže popíšeme v následující podkapitole.

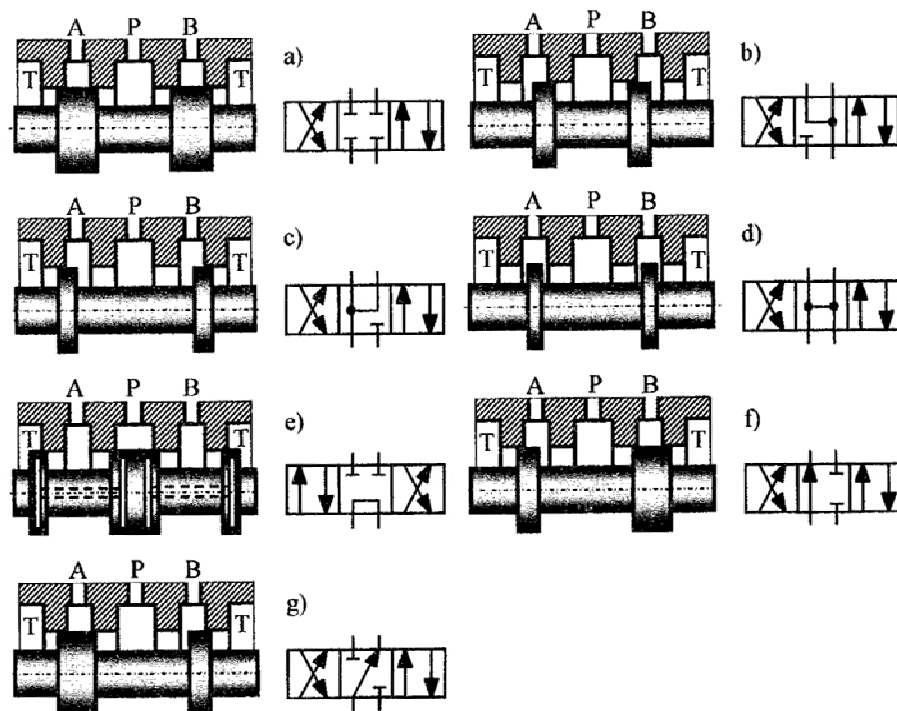
### 2.1.1 Šoupátkové rozváděče

V hydraulických mechanismech jsou v současné době používány téměř výhradně rozváděče s přímočarým pohybem šoupátka. Rozváděče s rotačním pohybem šoupátka jsou použitelné jen pro nízké pracovní tlaky z důvodu komplikovaného radiálního vyvážení (přestavené síly), obtížnějšího utěsnění a omezení v ovládání, které je vesměs mechanické.





Obr. 3. Šoupátkový rozváděč elektromagneticky ovládaný [8]



Obr. 4. Princip šoupátkových rozvaděčů [2]

Rozváděče s přímočarým pohybem šoupátka se skládají z tělesa, ve kterém je válcový otvor s několika kruhovými vybráními, která odpovídají počtu cest válcového šoupátka s nákrůžky, které je axiálně posuvné ve válcovém otvoru tělesa a mechanismu ovládání. Pro základní představu o uspořádání rozváděčů s přímočarým pohybem šoupátka jsou na *obr. 4* ukázány schématicky tvary těles a šoupátek pro *provedení 4/3* (čtyřcestné třípolohové) spolu s příslušnými symboly [2].

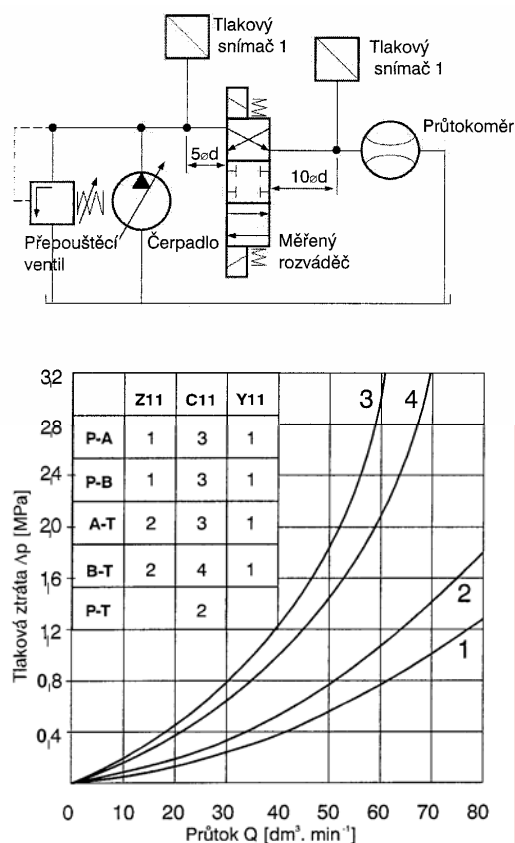
Šoupátka rozváděčů se vyrábějí:

- dvounákrůžková
- čtyřnákrůžková.

### 2.1.2 Vlastnosti a hlavní parametry rozváděčů

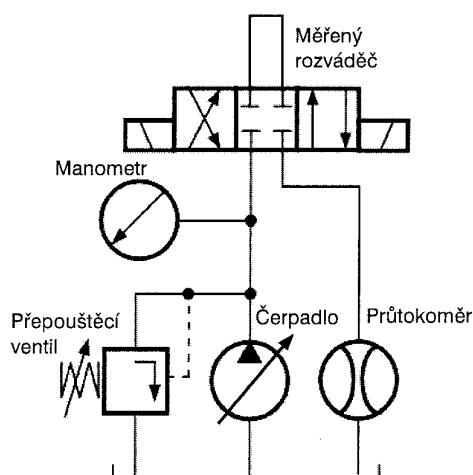
**Tlaková ztráta:** v podkladech výrobců se tlaková ztráta uvádí pro jednotlivá propojení cest - viz. *obr. 5*. Údaj je důležitý pro stanovení celkové tlakové ztráty obvodu. Tlaková ztráta se obvykle určí bez vlivu připojovacích kostek a vedení, což však většina výrobců neuvádí. Jako orientační hodnoty jsou údaje z katalogů dostatečné.

Z *obr. 5* je rovněž patrné, jak se tlaková ztráta určí. Zkoušený rozváděč je sepnut, před a za řídicí hranou je snímač tlaku. Regulačním čerpadlem se plynule zvyšuje průtok a odečítá tlak na snímačích. Rozdíl tlaků je tlaková ztráta pro dané propojení (v tomto případě P - B) závislá na průtoku. Tento postup se opakuje pro všechna propojení [8].

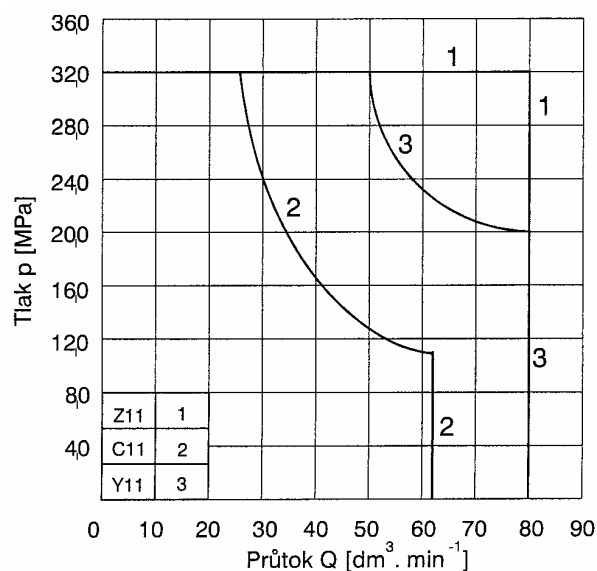


Obr. 5. Tlaková ztráta [8]

**Výkonové křivky:** udávají, jaký hydraulický výkon rozváděč spíná. Hydraulickým výkonem se přitom rozumí průtok a tlakový spád na rozváděči, resp. na jeho hranách. Schéma zapojení obvodu při zjišťování výkonových křivek je na *obr. 6*. Tlakovým ventilem a regulačním čerpadlem jsou nastavovány různé kombinace vstupního tlaku a průtoku. Zkouší se, zda rozváděč spolehlivě a opakovaně spíná i odepíná. Tlak a průtok se mění tak dlouho, až je nalezena hranice, kdy rozváděč ještě spíná a ta je zanesena do grafu. Plocha pod křivkou je funkční oblast rozváděče. Příklady výkonové křivky pro elektro-magneticky ovládaný rozváděč *RPE3-06* je na *obr. 7*. Vždy je třeba vzít v potaz všechny podmínky měření výkonových křivek, které mohou výsledek významně ovlivnit, jedná se zejména o teploty, viskozity, oteplení magnetů apod. [8].



Obr. 6. Schéma [8]



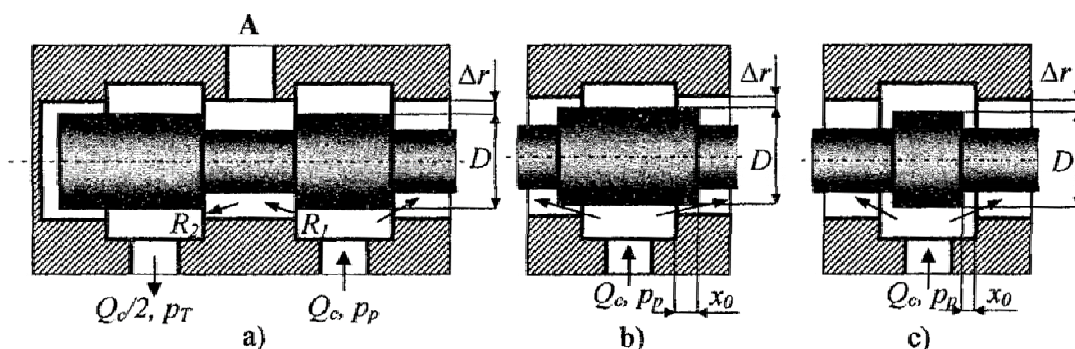
Z11 - 1	C11 - 2	Y11 - 3

Obr. 7. Výkonové křivky [8]

### 2.1.3 Ztrátový průtok šoupátkem v neutrální poloze

Ztrátový průtok (svodová propustnost) se měří v neutrální poloze šoupátka při zahrazených cestách  $A$  a  $B$ .

Vzhledem k souměrnosti šoupátka je na *obr. 8a* zobrazena pouze polovina šoupátka se zakrytou cestou  $A$ . Ztrátový průtok  $Q_c$  se s ohledem na symetričnost provedení šoupátka rozdělí do dvou větví po  $Q_c/2$  a vzhledem k tomu, že v každé větvi jde o průtok dvěma stejnými odpory  $R_1$  a  $R_2$  rozdělí se na nich rovnoměrně i tlakový spád po  $(p_p - p_T)/2$ . Bez újmy na podstatě úlohy položíme tlak  $p_T = 0$ .



Obr. 8. Průtok šoupátkem s: a) nulovým, b) pozitivním, a c) negativním překrytím  $x_0$  a radiální vůlí  $\Delta r$  [2]

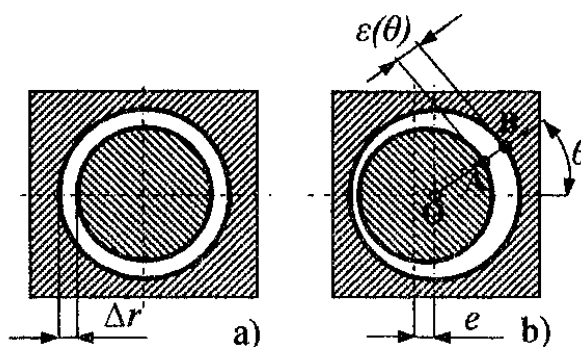
**Pro nové šoupátko s nulovým překrytím  $x_0 = 0$  a funkční vůlí  $\Delta r$  (obr. 8a)** předpokládáme laminární průtok obdélníkovou mezerou o velikosti  $\Delta r$  a šířce  $b = \pi \cdot D$ , můžeme pro ztrátový průtok psát [2]:

$$Q_c = \frac{\pi^2 \cdot D \cdot \Delta r^2}{32 \cdot \eta} \cdot p_p \quad (1)$$

**U šoupátka s pozitivním překrytím  $+x_0$  s funkční vůlí  $\Delta r$  (obr. 8b)** jde o laminární průtok mezikruhovou mezerou, pro kterou při  $I = x_0$  a nenulové excentricitě  $e$  (obr. 9b) platí [2]:

$$Q_c = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta r^3}{12 \cdot \eta \cdot x_0} \cdot \left[ 1 + 1,5 \cdot \left( \frac{e}{\Delta r} \right)^2 \right] \cdot p_p \quad (2)$$

$Q_c$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] – ztrátový průtok,  
 $D$  [m] – průměr šoupátka,  
 $\Delta r$  [m] – funkční vůle,  
 $\eta$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] – dynamická viskozita,  
 $x_0$  [m] – překrytí šoupátka,  
 $e$  [m] – excentricita uložení,  
 $p_p$  [Pa] – vstupní tlak.

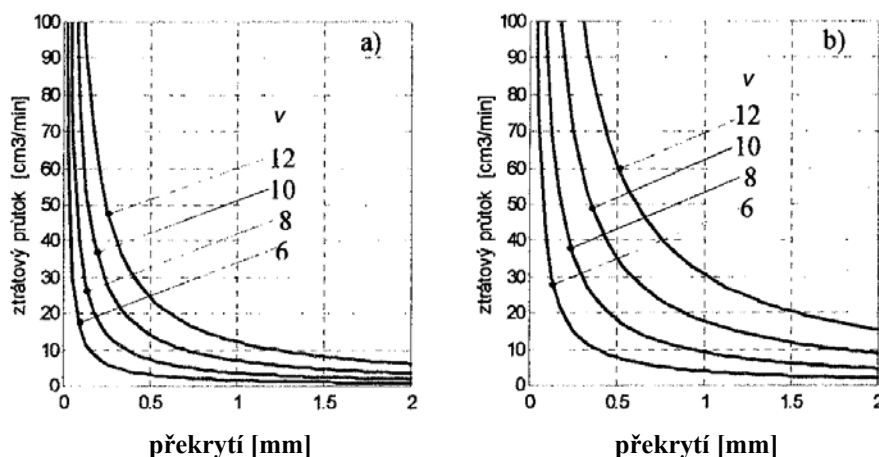


Obr. 9. Štěrbina ve tvaru mezikruží tvořená:

a) soustřednými, b) excentrickými  
válnovými plochami [2]

V případě, že šoupátko je uloženo excentricky s excentricitou  $e = \Delta r$ , potom průtok šoupátkem je **2,5 krát větší** než u koncentrických válcových ploch.

Na obr. 10 jsou zachyceny graficky funkční závislosti  $Q_c(x_0)$  pro šoupátko průměru  $D = 10 \text{ mm}$ , tlakový spád  $\Delta p = 10 \text{ MPa}$  a pro různé vůle  $v$ .



Obr. 10. Ztrátový průtok válcovým šoupátkem v závislosti na pozitivním překrytí pro různé velikosti vůle a) pro souosé šoupátko, b) pro excentrické šoupátko s excentricitou rovnou velikosti vůle (průměr šoupátka  $10 \text{ mm}$ , tlakový spád  $10 \text{ MPa}$ , kinematická viskozita  $32 \text{ mm}^2/\text{s}$ , hustota  $870 \text{ kg/m}^3$ ) [2]

Lze předpokládat a experimenty to potvrzují, že skutečný ztrátový průtok bude větší než vypočtené hodnoty, protože se projeví neostrost hran, případně další geometrické nepřesnosti a vliv obvodových drážek [2].

**U šoupátka s negativním překrytím**  $-x_0$  s funkční vůlí  $\Delta r$  (obr. 8c) předpokládáme turbulentní průtok, takže ztrátový průtok je dán obecně rovnicí:

$$Q_c = \mu \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_p} \quad (3)$$

$\mu$  [-] – průtokový součinitel

$S$  [m<sup>2</sup>] - průřez

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - hustota

$p_p$  [Pa] - vstupní tlak

$\Delta r$  [m] - funkční vůle

$x_0$  [m] - překrytí šoupátka

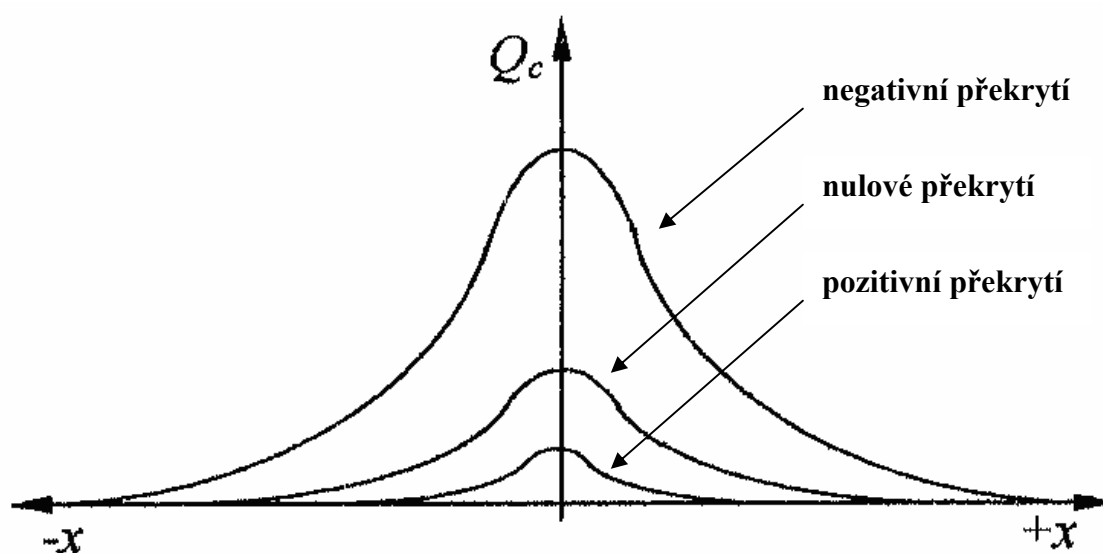
$D$  [m] - průměr šoupátka

kde průtočná plocha

$$S = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\Delta r^2 + x_0^2} \cdot (D + \Delta r) \quad (4)$$

Na *obr. 11* je schématicky znázorněna funkční závislost  $Q_c(x)$ . Ztrátový průtok je maximální v neutrální poloze šoupátka a s jeho posunutím  $x$  se rapidně snižuje, protože řídící hrana šoupátka zakrývá cestu do odpadní větve.

POZNÁMKA - Jestliže má být ztrátový průtok při pozitivním překrytí menší, než při nulovém překrytí, potom z porovnání vztahu (1) a vztahu (2) pro  $e = 0$  vyplývá, že  $|x_0| > 0,85 \cdot \Delta r$ .



Obr. 11. Typický průběh ztrátového průtoku v závislosti na posunutí šoupátka ze střední polohy [2]

Dosažení nulové svodové propustnosti při hrazení průtoku není u tohoto typu rozváděčů, vzhledem k nutné funkční vůli nezbytné pro pohyb šoupátka, možné. Šoupátko je zpravidla uloženo přímo v tělese, povětšinou s vůlí 6 až 12  $\mu\text{m}$  (tzv. spárové těsnění). Vůle je kompromisem mezi výrobními náklady, náchylností k zanášení a přijatelnými objemovými ztrátami. Za účelem zmenšení svodové propustnosti se dělá šoupátko s pozitivním překrytím  $+x_0$ . Velikost překrytí je rovněž kompromisem mezi šířkou nákrůžku a zdvihem šoupátka a akceptovatelnými ztrátami [2].

#### 2.1.4 Síly působící na šoupátko rozváděče

Síly, které působí na šoupátko rozváděče, zejména jejich nevyvážené axiální složky, určují velikost přestavné síly, která má podstatný vliv na volbu ovládacího mechanismu a jeho velikost, nebo způsobují případná výkonová omezení. Na šoupátko působí:

**Zrychlující síla -  $F_a$ :** při přestavování rozváděče musejí být urychleny z klidového stavu šoupátko a všechny části pohybující se spolu s ním (části pružin, opěrné talíře apod.). Na konci zdvihu musí být naopak kinetická energie pohybujících se hmot převedena na jiný druh energie (deformační energie pružiny, teplo), pokud možno bez rázu. Zrychlující síla, pro pohyb ve směru  $x$  je :

$$F_a = m \cdot \ddot{x} \quad (5)$$

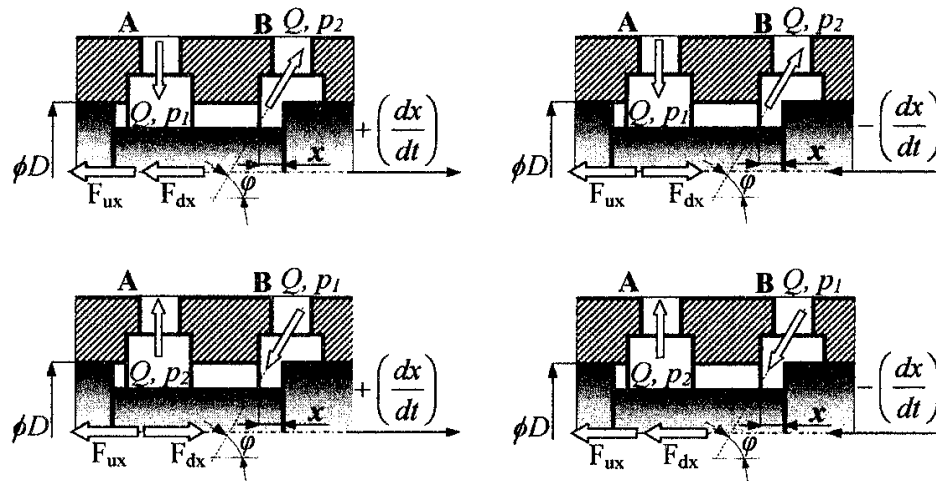
kde  $m$  [kg] je celková hmotnost pohybujících se částí,  $\ddot{x}$  [ $\text{m.s}^{-2}$ ] zrychlení šoupátka. Krátké přestavné časy vedou k větším hodnotám zrychlení, avšak je-li zdvih šoupátka malý, nezvětší se příliš ani přestavná síla.

**Síla pružiny -  $F_p$ :** je dána jejím předpětím  $F_{p0}$  [N], tuhostí  $k$  [ $\text{N.m}^{-1}$ ] a zdvihem šoupátka  $x$  [m].

$$F_p = F_{p0} + k \cdot x. \quad (7)$$

Pružina musí vracet šoupátko z pracovní do základní, nebo neutrální polohy, přičemž musí zajistit požadovaný přestavný čas.

**Hydrodynamické síly:** resp. jejich axiální složky působící na šoupátko rozváděče jsou stacionární  $F_{ux}$  a nestacionární  $F_{dx}$ . U rozváděčů představují hydrodynamické síly zvláště silný jev. Působení těchto sil je shrnuto v *obr. 12*.



Obr. 12. Hydrodynamické síly působící na šoupátko při průtoku AB, resp. BA při otevírání  $+(dx/dt)$  a zavírání  $-(dx/dt)$  rozváděče [2]

Je uvažován výtok i vtok přes otvírající a uzavírající se mezeru. Ustálená složka  $F_{ux}$  hydrodynamické síly je při konstantním tlakovém spádu  $p_s = p_1 - p_2$  úměrná, stejně jako průtok. Posunutí šoupátka  $x$  působí při otevírání rozváděče proti této změně a zvyšuje přestavnou sílu. Při uzavírání rozváděče je tomu právě naopak.

Smysl působení neustálené složky  $F_{dx}$  je závislý na tom, zda sloupec kapaliny uzavřený v prostoru šoupátka je v daném případě urychlován  $dQ/dt > 0$ , nebo brzděn  $dQ/dt < 0$ , působí tedy jako pozitivní, nebo negativní tlumení. Velikost  $F_{dx}$  při stálém tlakovém spádu  $p_s$  je úměrná rychlosti pohybu šoupátka. Uvažovaná podmínka konstantního tlakového spádu nemusí být však splněna. Časová změna průtoku  $dQ/dt$  rozváděčem může být způsobena jak změnou jeho otevření, tak změnou tlaku před, nebo za rozváděčem, při konstantním posunutí šoupátka ( $x = \text{konst.}$ ), anebo oběma vlivy.

Pro stacionární složku hydrodynamické síly můžeme psát:

$$F_{ux} = 2 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot x \cdot p_s \cdot \cos \varphi \quad (8) \quad \alpha [-] - \text{součinitel kontrakce proudu tekutiny,}$$

nebo

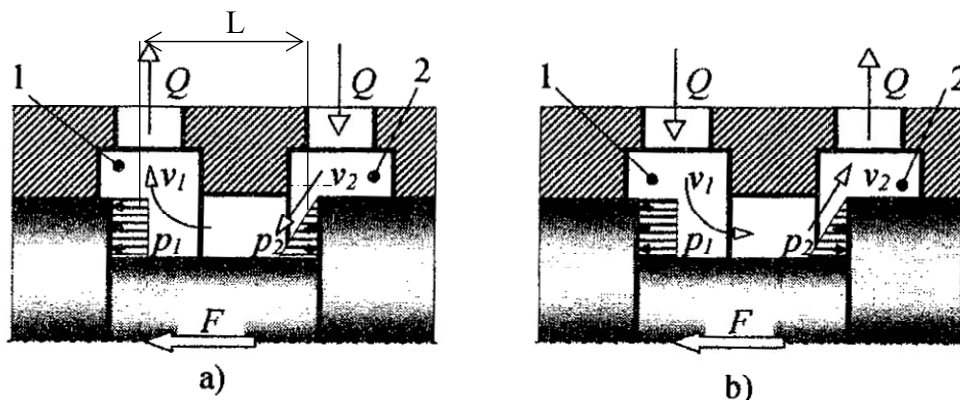
$$F_{ux} = \frac{\rho \cdot Q^2 \cdot \cos \varphi}{\alpha \cdot \pi \cdot D \cdot x} \quad (9) \quad Q [\text{m}^3/\text{s}] - \text{průtočné množství.}$$



Pro nestacionární složku hydrodynamické síly můžeme psát:

$$F_{dx} = \rho \cdot L \cdot \frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot p_s} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

POZNÁMKA - Pro běžné rozměry rozváděčů je nestacionární složka vůči stacionární složce hydrodynamické síly zanedbatelná.



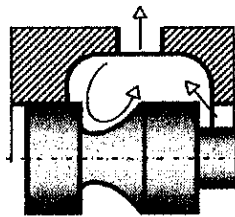
Obr. 13. Rozdělení tlaků na mezikružích šoupátka při ustáleném průtoku [2]

Podstatné je rovněž působení nestejných tlaků na mezikruhové plochy šoupátka při ustáleném proudění (obr. 13). Zanedbáme-li účinek tření mezi místy 1 a 2, pak pro nestlačitelnou kapalinu a jednorozměrné osově symetrické proudění, vyplývá ze zákona zachování energie, že součet tlakové a kinetické energie musí být stálý, což pro jednotku objemu popisuje *Bernoulliho rovnice*:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (11)$$

která říká, že v místě, kde je rychlost proudící tekutiny  $v_2 > v_1 [m/s]$ , musí být tlak  $p_2 < p_1 [Pa]$ . Vidíme, že tak vzniká další tlaková síla. Zmenšit hydrodynamické síly, nebo kompenzovat jejich vliv a eliminovat tlakové rušivé síly je jedním ze stěžejních problémů spojených s konstrukcí rozváděčů.

Šoupátko je možné rovněž vhodně tvarovat (obr. 14), aby se dosáhlo takového charakteru proudění, že výsledná hydrodynamická síla je v určitém rozsahu zdvihu šoupátka nulová, nebo dokonce změni smysl a napomáhá otevření šoupátka.



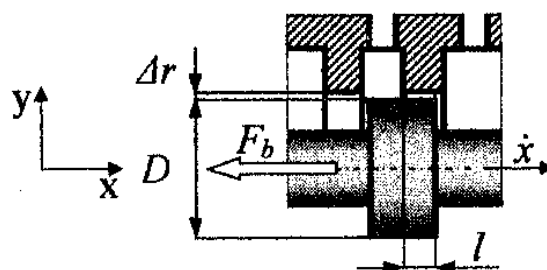
Obr. 14. Tvarové šoupátko [2]

**Síla pasivních odporů  $F_b$ :** při čistě kapalinném tření je dána styčnou plochou mezi šoupátkem a tělesem  $S = \pi \cdot D \cdot l$  [ $m^2$ ] (obr. 15) a tečným napětím  $\tau$  [ $Pa$ ] v kapalině, které je definováno Newtonovým zákonem:

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\dot{x}}{dy} \quad (12)$$

takže

$$F_b = \eta \cdot S \cdot \frac{d\dot{x}}{dy} \quad (13)$$

Obr. 15. Kapalinné tření,  
koeficient tlumení [2]

a pro velmi malou funkční vůli  $\Delta r$  lze psát

$$F_b = \eta \cdot S \cdot \frac{\dot{x}}{\Delta r} = b \cdot \dot{x} \quad (14)$$

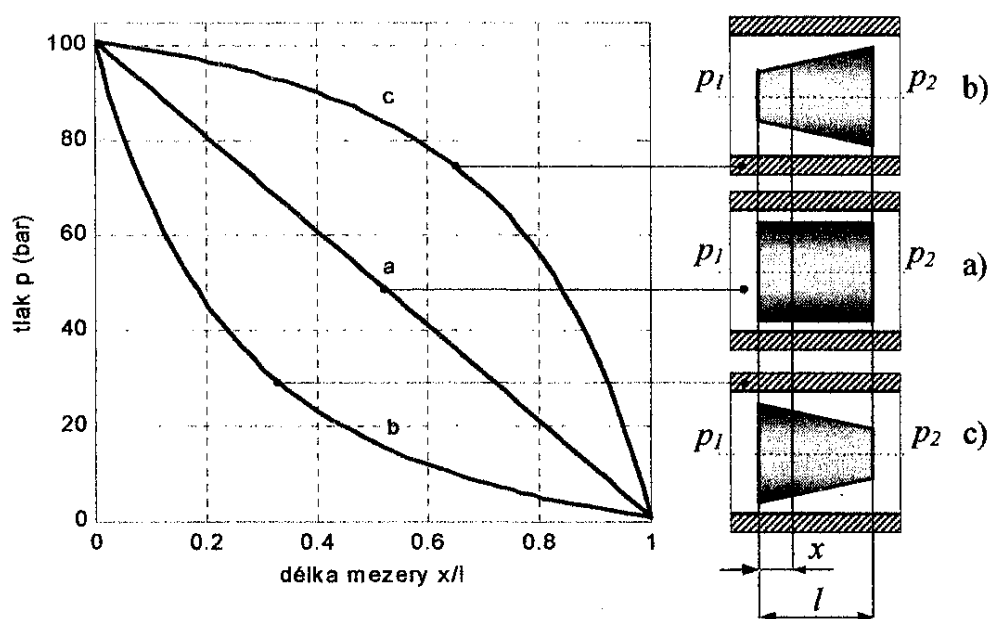
$\eta$  [ $Pa \cdot s$ ] - dynamická viskozita

$\frac{d\dot{x}}{dy}$  [ $s^{-1}$ ] - změna rychlosti pohybu šoupátka v závislosti na vzdálenosti od třecí plochy

Síla  $F_b$  je závislá především na dynamické viskozitě  $\eta$  kapaliny a na rychlosti pohybu  $\dot{x}$  šoupátka. Pro konstantní viskozitu a určitou styčnou délku  $l$ , je přímo úměrná rychlosti (koeficient tlumení  $b$ ).

Případ ryze kapalinného tření nastane jedině tehdy, je-li šoupátko soustředné s dírou v tělese, tzn., že veškeré radiální síly působící na šoupátko se vzájemně ruší - šoupátko je radiálně vyváжено.

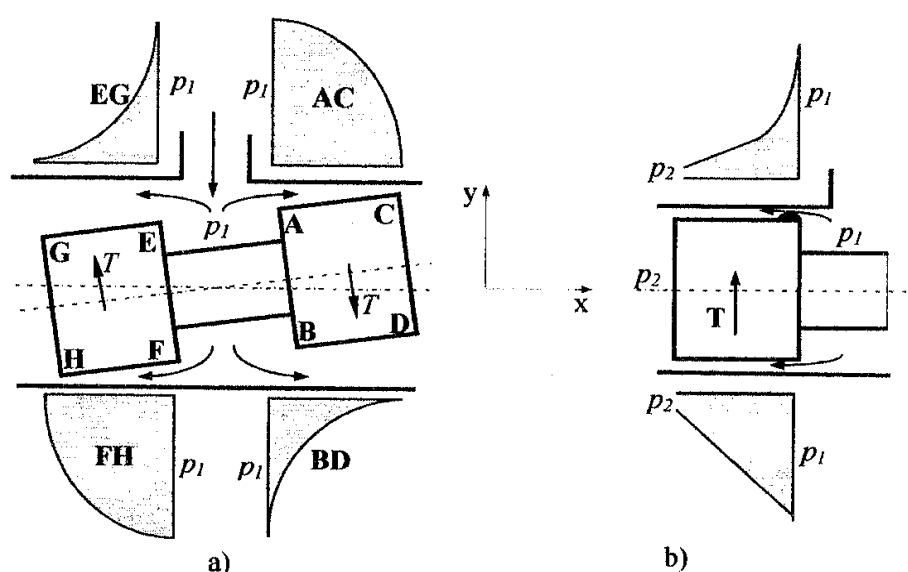
**Radiální síly:** základní příčinou zvětšení třecí síly v kluzné dvojici je nerovnoměrné rozložení tlaku v mezeře (funkční vůli) mezi šoupátkem a pouzdrem, kterou kapalina protéká z prostoru vysokého tlaku do prostoru o nízkém tlaku. Při proudění kapaliny se tlak podél mezery zmenšuje a působí na šoupátko radiální silou. Ve všech případech, kdy jsou pouzdro a nákržky šoupátka osově symetrické a jsou-li jejich osy totožné, potom síla způsobující radiální posunutí šoupátka je nulová, protože charakter změny mezery v libovolném řezu rovinou procházející osou pouzdra bude stejný. To znamená, že zákonitost změny tlaku podél mezery je stejná a radiální síly jsou vzájemně vyvážené. Asymetrické rozložení tlaku, které vyvolává nevyváženou boční sílu na šoupátko, vzniká v tom případě, když charakter změny mezery mezi nákržky šoupátka a pouzdrem není v různých osových podélných řezech stejný, tzn., že mezera se buď rozšiřuje nebo zužuje a nebo má jiný tvar.



Obr. 16. Typy mezer a charakter změny tlaku podél mezery: a) paralelní, b) rozšiřující, c) zužující [2]

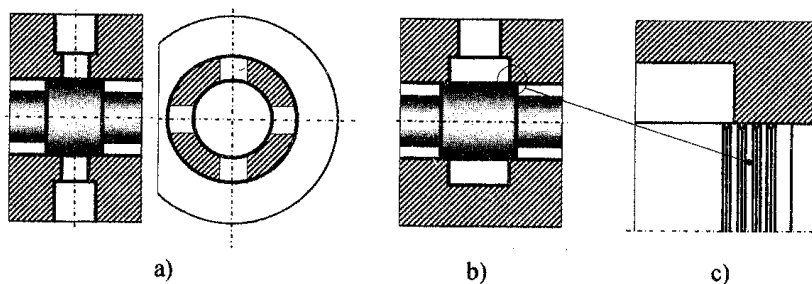
Na *obr. 16* jsou ukázány jednoduché tvary mezer a k nim za zjednodušujících předpokladů (jednorozměrné laminární proudění nestlačitelné kapaliny, neměnná viskozita podél mezery) vypočtené průběhy tlaků.

Na *obr. 17a* je zakreslena nestabilní poloha válcového šoupátka. Takovýto stav nastane při nesouososti dvojice šoupátko - pouzdro. Je-li na šoupátku vypouklá část, např. otřep (*obr. 17b*) nacházející se v části obvodu nákržku, je příčinou snížení tlaku a jestliže na protilehlé straně není nic podobného, působí na šoupátko radiální síla, která je tím větší, čím větší je nerovnost. Ovšem jestliže šoupátko i pouzdro mají pravidelný geometrický tvar, může podobný jev nastat v důsledku částečky nečistoty. Tato skutečnost vyvolá radiální posunutí šoupátka na tu stranu, kde se nakupily nečistoty. V důsledku existence nevyvážených radiálních sil může dojít k tzv. "navalení šoupátka" na stěnu pouzdra a prakticky jím nelze pohnout. Řešením tohoto problému je opatření nákržků šoupátka obvodovými drážkami, kterými se šíří tlak po obvodu nákržků a v podélném směru se stupňovitě snižuje. Ovšem drážky zmenšují těsnicí délku nákržku - zvětšují propustnost, proto je potřeba šířku drážek dělat pokud možno malou, nakolik to dovoluje technologie výroby,  $0,3 - 0,5 \text{ mm}$  a hloubku  $0,6 - 1,0 \text{ mm}$ . Při výrobě je potřeba dodržet šířku drážek po celém obvodu, aby v důsledku jejich proměnného průřezu nevznikal tlakový spád a tudíž přidavné radiální síly.



Obr. 17. Změna tlaku v mezerách: a) s různoběžným šoupátkem, b) při existenci místní vypouklé části [2]

Při konstrukci rozváděče, resp. všech ventilů, jejichž funkční součástí je šoupátko, je potřeba zajistit úplné statické vyvážení radiálních sil. Proto je nezbytné, aby otvory v tělese, či pouzdru byly rozmístěny po obvodu šoupátka symetricky (obr. 18a), nebo byla použita válcová vybrání (obr.18b) a nákržky šoupátek byly opatřeny obvodovými drážkami (obr.18c) [2].



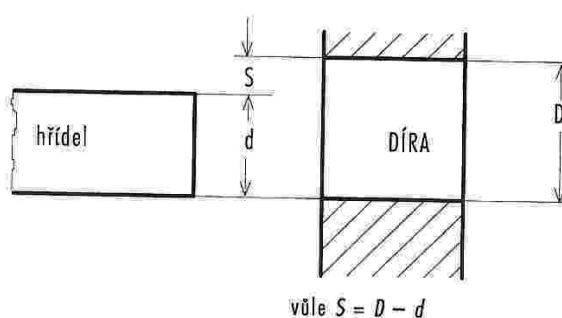
Obr. 18. Radiální statické vyvážení šoupátek: a) symetricky umístěné otvory, b) válcové vybrání v tělese, c) obvodové drážky [2]

## 2.2 Rozměrová analýza

### 2.2.1 Uložení s vůlí

Nastane, pokud je skutečný rozměr hřídele menší než skutečný rozměr díry (obr. 19).

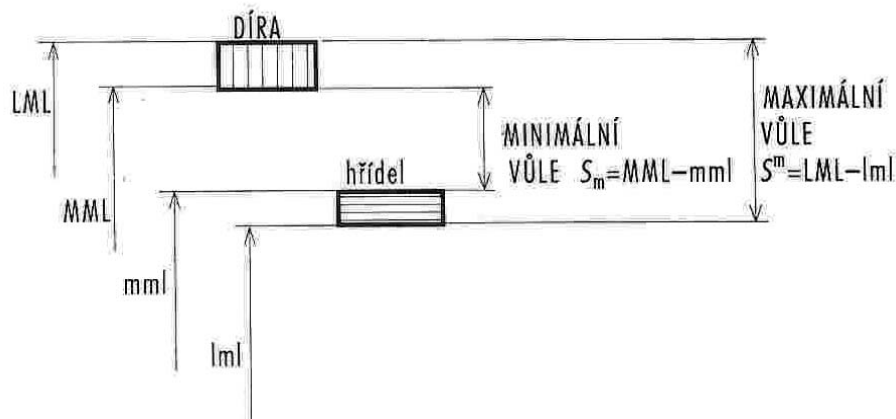
POZNÁMKA - Vůle bývá označována v naší odborné literatuře písmenem  $v$  nebo  $V$ , v zahraniční obvykle písmenem  $S$  (z německého Spiel). Ve starší lícovací soustavě ISA byla uložení s vůlí nazývána hybná (volná) a dělila se dále podle velikostí vůle na uložení točná a smyková.



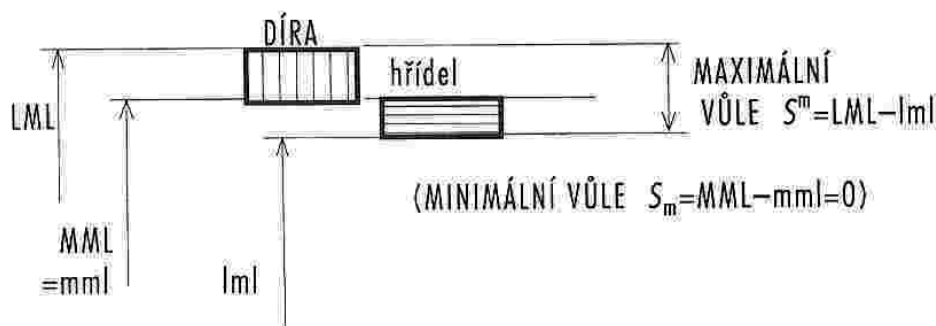
Obr. 19. Skutečná vůle v uložení [3]

Aby vzniklo uložení s vůlí, musí být předepsaný horní mezní rozměr hřídele vždy menší než předepsaný dolní mezní rozměr díry (obr. 20), nejvýše si mohou být rovné. Vůle se pak může měnit v závislosti na skutečných rozměrech od minimální hodnoty  $S_m$  do maximální hodnoty  $S^m$ , přitom minimální hodnota vůle může být nulová ( $S_m = 0$ , obr. 21).

POZNÁMKA - Při konstrukčním řešení součástí, které mají tvořit uložení s vůlí, je vhodné dostatečně zkosit ty hrany hřídele i díry, které budou při montáži ležet proti sobě, např. u válcového hřídele a válcové díry je třeba vytvořit kuželové zkosení, které při montáži vystředí hřídel proti díře. V některých případech se při montáži užívá vodícího trnu.



Obr. 20. Uložení s vůlí [3]

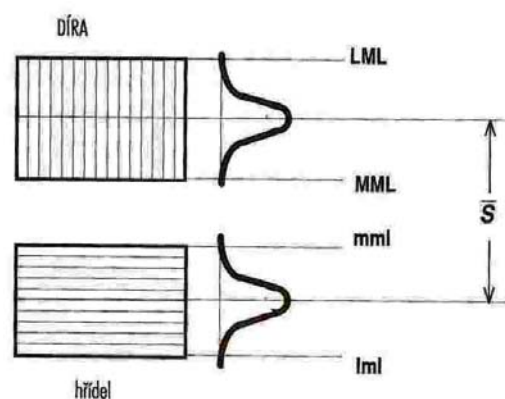


Obr. 21. Uložení s nulovou minimální vůlí [3]

Vzhledem k normálnímu rozložení skutečných rozměrů přibližně podle Gaussovy křivky, kdy je předpoklad největší četnosti skutečných rozměrů uprostřed mezi oběma mezními rozměry, bude se v uložení vyskytovat nejčastěji střední hodnota vůle  $\bar{S}$  (obr. 22). Menší a větší hodnoty vůle než střední se budou vyskytovat méně často a mezní hodnoty  $S_m$  a  $S^m$  jen výjimečně. Střední hodnotu vůle vypočítáme z mezních rozměrů podle rovnice [3]:

$$\bar{S} = \frac{LML + MML}{2} - \frac{lml + mml}{2} \quad (15)$$

$\bar{S}$  [mm] - střední hodnota vůle,  
 $LML$  [mm] - horní mezní rozměr díry,  
 $MML$  [mm] - dolní mezní rozměr díry,  
 $mml$  [mm] - horní mezní rozměr hřídele,  
 $lml$  [mm] - dolní mezní rozměr hřídele.



Obr. 22. Střední hodnota vůle [3]

## 2.2.2 Geometrické tolerance vztahující se k jednomu prvku

Do této skupiny patří všechny tolerance předepisující toleranční pole (nebo toleranční prostor), v němž musí ležet tolerovaný prvek (osa, površka atd.).

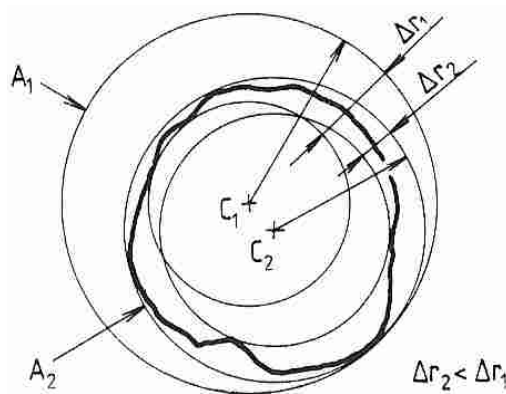
### 2.2.2.1 Tolerance kruhovitosti

Kruhovitost je určena polohou dvou soustředných kružnic tak, aby vzdálenost mezi nimi byla nejmenší. Přitom jedna z obou kružnic je kružnicí obalovou (opsanou pro profil díry a vepsanou pro profil hřídele), druhá je s ní soustředná a dotýká se povrchu. Z více takových kružnic se vybírají ty, jejichž radiální vzdálenost je nejmenší. Obr. 23 ukazuje dvě možné polohy středů soustředných kružnic a jejich nejmenší vzdálenost.

Střed  $C_1$  kružnice  $A_1$  náleží prvním dvěma soustředným kružnicím, střed  $C_2$  kružnice  $A_2$  náleží druhým dvěma soustředným kružnicím.

Příslušné radiální vzdálenosti kružnic jsou  $r_1$  a  $r_2$ , a z obrázku vyplývá, že  $\Delta r_2 < \Delta r_1$ .

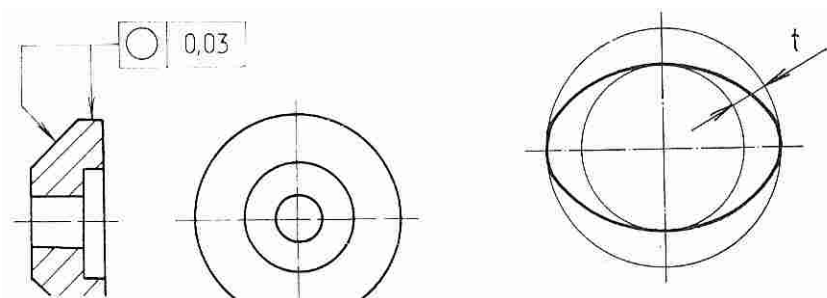
Správná poloha soustředných kružnic je ta, která je označena  $A_2$ . Radiální vzdálenost  $r_2$  smí být nejvýše rovna toleranci kruhovitosti.



Obr. 23. Obalové kružnice [3]

Toleranční pole je ohraničeno v dané rovině průřezu mezikružím mezi dvěma soustřednými kružnicemi. Šířka mezikruží je rovna předepsané hodnotě tolerance kruhovitosti  $t$ .





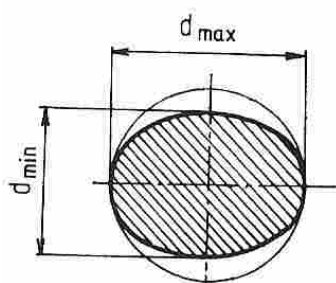
Obr. 24. Tolerance kruhovitosti [3]

Skutečná kružnice (profil) v kterémkoliv průřezu musí ležet mezi dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými od sebe  $0,03 \text{ mm}$ . Obě kružnice leží v rovině průřezu a větší z nich je těsně opsána skutečnému profilu (obr. 24).

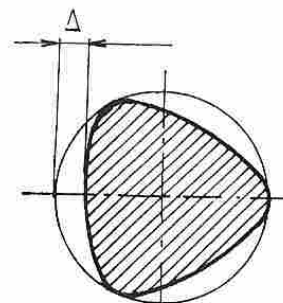
Zvláštními případy úchylky kruhovitosti jsou **ovalita** a **hranovitost**.

**Ovalita** je úchylka kruhovitosti, při níž je skutečný profil ovál, jehož největší a nejmenší rozměr leží ve vzájemně kolmých směrech (obr. 25).

**Hranovitost** je úchylka kruhovitosti, při níž je skutečný profil mnohohran a rozlišuje se podle počtu hran. Zejména hranovitost s malým počtem hran je charakteristická tím, že průměry profilu v příčném řezu jsou ve všech směrech stejné (obr. 26) [3].



Obr. 25. Oválný profil [3]



Obr. 26. Hranovitý profil [3]

$$\Delta = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} \quad (16)$$

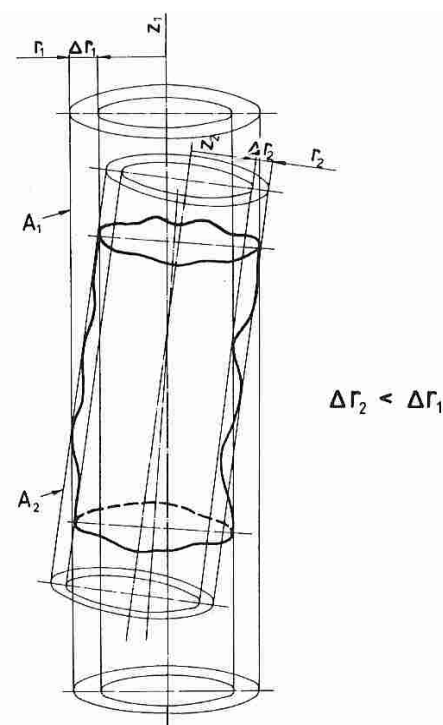
$\Delta$  [mm] – rozměrová úchylka,

$d_{\max}$  [mm] – maximální průměr,

$d_{\min}$  [mm] – minimální průměr.

### 2.2.2.2 Tolerance válcovitosti

Válcovitost jednotlivého tolerovaného prvku je považována za správnou tehdy, jestliže se skutečný válec nalézá mezi dvěma sousými válci ideálního geometrického tvaru, jejichž radiální vzdálenost je nejvýše rovna předepsané toleranci válcovitosti. Přitom jeden z válců je válcem obalovým (vepsaným válcové díře nebo opsaným válcovému hřídeli) a poloha osy těchto dvou ideálních válců je taková, že radiální vzdálenost obou válců ideálního geometrického tvaru je nejmenší (obr. 27). Z obrázku vyplývá, že  $\Delta r_2 < \Delta r_1$ . Proto je správná ta poloha válců, která je označena  $A_2$ , přitom radiální vzdálenost mezi válci ideálního geometrického tvaru nesmí být větší než předepsaná tolerance válcovitosti.



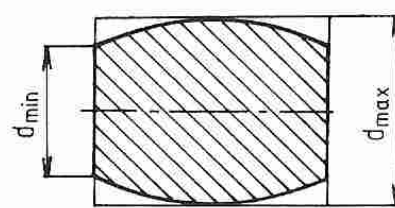
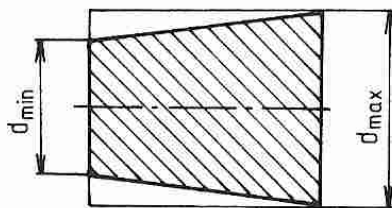
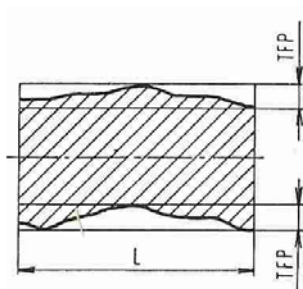
Obr. 27. Obalové válce [3]

POZNÁMKA - V ČSN 01 4401: 1981 (ST SEV 301-76) je uvedena tolerance profilu podélného řezu válcovou plochou, která se předepisuje a vyhodnocuje v rovině obsahující osu rotace válcové plochy (obr. 28). Obalové přímky mají takový směr, aby vzdálenost mezi obalovou přímkou skutečného profilu válce v osově rovině a s ní vedenou rovnoběžkou byla minimální. Vzdálenost obalové přímky a rovnoběžky s ní vedené může být nejvýše rovna předepsané toleranci profilu podélného řezu válcovou plochou TFP. Úchylka profilu podélného řezu charakterizuje jednak přímost, jednak rovnoběžnost tvořících čar. Zvláštními případy jsou kuželovitost válcové plochy, soudkovitost a sedlovitost.

**Kuželovitost** je taková úchylka profilu podélného řezu, kdy jsou tvořící čáry sice přímé, ale nikoliv rovnoběžné (obr. 29).

**Soudkovitost** nebo **sedlovitost** je úchylka profilu podélného řezu, kdy nejsou tvořící čáry přímé a průměry příčných řezů se mění od krajů ke středu podélného řezu (obr. 30).

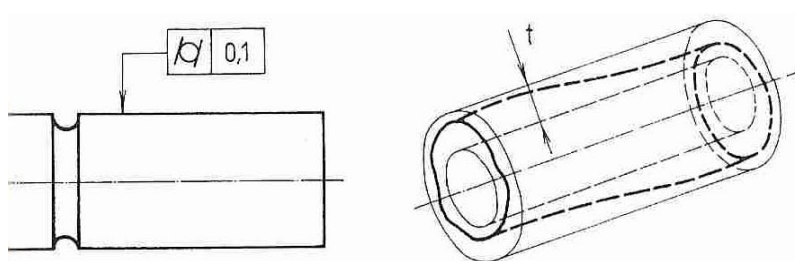
V obou případech platí, že úchylka podélného řezu  $\Delta$  je dána vztahem (16, str. 31).



Obr. 28. Tolerance profilu [3]    Obr. 29. Kuželovitost [3]    Obr. 30. Soudkovitost [3]

Tolerance válcovitosti lze nahradit všeobecnými tolerancemi přímosti povrchů, všeobecnými tolerancemi kruhovitosti profilů průřezů a všeobecnými tolerancemi rovnoběžností protilehlých povrchů, proto nejsou normou stanoveny.

Toleranční pole je ohraničeno prostorem mezi dvěma sousými válci vzdálenými od sebe o hodnotu předepsané tolerance válcovitosti  $t$ .



Obr. 31. Tolerance válcovitosti [3]

Skutečná válcová plocha musí ležet mezi dvěma sousými válci. Válce jsou od sebe vzdáleny  $0,1 \text{ mm}$  a větší z nich je těsně opsán skutečnému válci (obr. 31) [3].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem je prozkoumat vliv konečného opracování a velikosti tolerance dvojice šoupátko – těleso na velikost svodové propustnosti (průtokových ztrát) rozváděče. Měření proběhla na rozváděči světlosti 10 označeném jako *RPE4-10*.

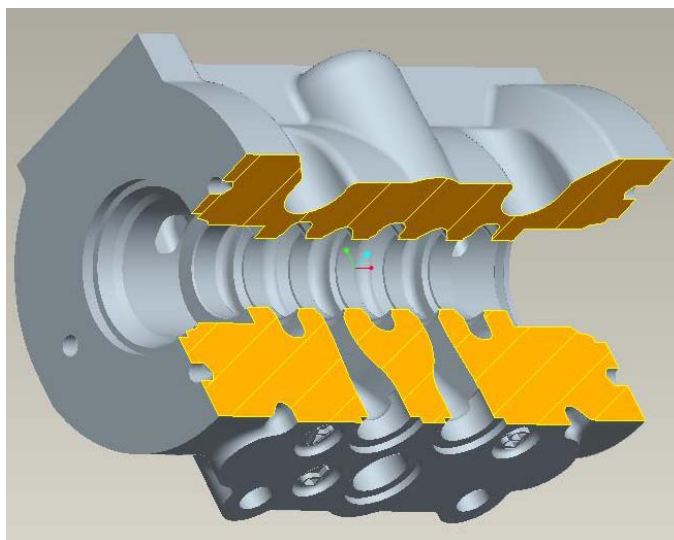
#### 3.1 Rozbor stávajícího stavu

V této podkapitole je popsána výroba tělesa a šoupátka rozváděče *RPE4-10*. Jsou zde uvedeny použité obráběcí stroje, měřidla a výrobní tolerance finálních rozměrů. Výkresová dokumentace je dispozici v *příloze 3*.

##### 3.1.1 Výroba tělesa rozváděče RPE4-10

Při výrobě tělesa jsou pro zajištění minimálního odporu (minimální tlakové ztráty) při uvolnění průtoku veškeré kanály a komory rozváděče vhodně tvarovány, rozměrově dostatečně dimenzovány a zhotoveny přesným litím. Těleso je ze šedé litiny *GG30*. Obrábějí se pouze dosedací a upevňovací plochy, plochy pro těsnění a válcový otvor pro šoupátko [2].

Předlité těleso se obrábí na vertikálním obráběcím centru *MCFV 100*. Po obrobení všech potřebných ploch následuje termické odjehlení a fosfátování. U takto nahrubo připraveného tělesa se honuje díra pro šoupátko na honovačce *KADIA* na konečný průměr  $D = 18 + 0,002 \text{ mm}$  s válcovitostí  $0,002 \text{ mm}$  a s jakostí povrchu do  $Ra = 0,2$ . Průměr tělesa se kontroluje vzduchovým kalibrem a zaoblení funkčních hran vizuálně laparoskopem.

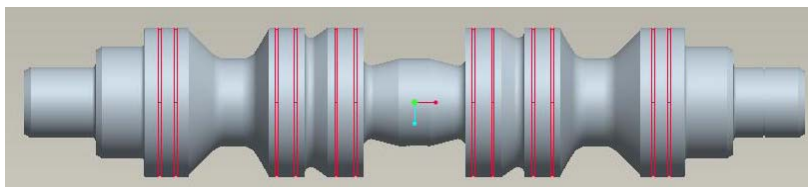


Obr. 32. Řez tělesem rozváděče RPE4-10

### 3.1.2 Výroba šoupátka rozváděče RPE4-10

Šoupátka jsou ocelová. Hovoří pro ně dobré kluzné vlastnosti i příznivá teplotní roztažnost ve srovnání s litinou tělesa rozváděče [2].

Tyčový polotovár z materiálu *11 109.0* je soustružen s přídavkem na broušení  $0,3\text{ mm}$  na dlouhotočném automatu *TORNOS BECHLER*. Takto nahrubo připravená šoupátka se cementují do hloubky  $0,6\text{ mm}$  a kalí na tvrdost  $58 \pm 2\text{ HRC}$ . Následuje hrubovací broušení v hrotech na průměr  $d = 18,03 - 0,02\text{ mm}$  a broušení na čisto na *CNC* brusce *STUDER S36* na konečný průměr  $d = 17,993 - 0,002\text{ mm}$  s válcovitostí  $0,002\text{ mm}$ . Šoupátka se kontrolují pomocí pasometru. Posledními operacemi výroby šoupátek jsou kartáčování, vizuální kontrola zaoblení funkčních hran mikroskopem a mytí.



Obr. 33. Šoupátko rozváděče RPE4-10

Výsledné uložení šoupátka v tělese je s maximální vůlí  $11\text{ }\mu\text{m}$  a s minimální vůlí  $7\text{ }\mu\text{m}$ .

### 3.2 Opatření pro snížení svodové propustnosti

Na velikost svodové propustnosti mají dle vztahu (2, str. 18):

$$Q_c = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta r^3}{12 \cdot \eta \cdot x_0} \cdot \left[ 1 + 1,5 \cdot \left( \frac{e}{\Delta r} \right)^2 \right] \cdot p_p$$

vliv tyto veličiny:  $D$  [m] – průměr šoupátka,  $x_0$  [m] – překrytí šoupátka,  
 $\Delta r$  [m] – funkční vůle,  $e$  [m] – excentricita uložení,  
 $\eta$  [Pa·s] – dynamická viskozita,  $p_p$  [Pa] – vstupní tlak.

V experimentu jsem se zaměřil na snížení funkční vůle, která se mění s třetí mocninou a tudíž má na velikost svodové propustnosti největší vliv. Zaměřil jsem se též na velikost válcovitosti, která souvisí s excentricitou uložení šoupátka v tělese (viz. str. 19). Pro tyto dvě veličiny jsem navrhl a po konzultaci s oddělením konstrukce firmy předepsal hodnoty uvedené v tab. 2.

Tab. 2. Druhy vzorků

<b>Těleso</b>	<b>Technologie</b>	<b>Válcovitost [mm]</b> 0,002	<b>D [mm]</b> 18+0,002	<b>Kusy</b> 5
<b>Šoupátko</b>	Studer	0,001	17,993-0,001	10
			17,995-0,001	10
			17,996-0,001	10
	BUA 20	0,001	17,993-0,001	10
			17,995-0,001	10
			17,996-0,001	10
	Bezhraté broušení Centerless	0,001	17,993±0,003	10
			17,996-0,001	15
<b>Celkem</b>				85

Vycházel jsem z jednoho přesně vyrobeného tělesa, do kterého byla vyrobena šoupátka o různých průměrech, třemi různými technologiemi broušení. Jednalo se o technologie broušení v hrotech na strojích *STUDER S36 CNC*, *BUA 20* a o technologii bezhratého broušení (centerless) na stroji *JUPITER 500*.

**Technologie broušení v hrotech:**

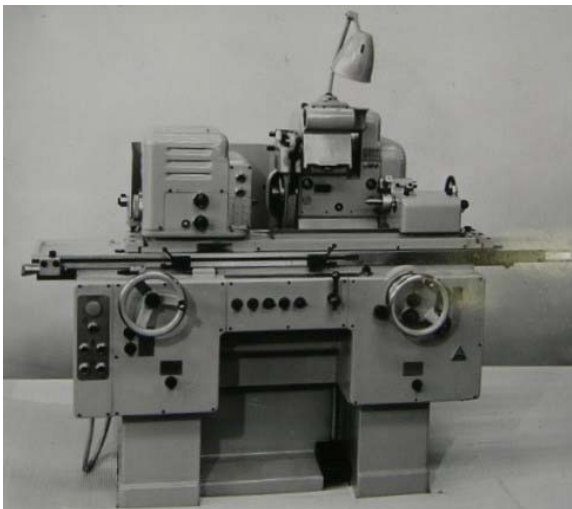
- *STUDER S36 CNC*, výrobce: Fritz Studer AG



Obr. 34. Bruska Studer S36 [4]

Materiál kotouče – umělý korund  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
Obvodová rychlost kotouče – 40 [m/s]  
Průměr kotouče – 500 [mm]  
Zrnitost kotouče – 220

- *BUA 20*, výrobce: TOS Hostivař



Obr. 35. Bruska BUA 20

Materiál kotouče – umělý korund  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
Obvodová rychlost kotouče – 35 [m/s]  
Průměr kotouče – 500 [mm]  
Zrnitost kotouče – 180

Obě technologie využívají obrábění zapichovacím způsobem s oscilací a jsou vybaveny polohovými měřidly.

**Technologie bezhrotého broušení (centerless):**

- *JUPITER 500*, výrobce: JUNKER BSH Machines, Holice



Materiál kotouče – CBN

Průměr kotouče – 500 [mm]

Obr. 36. Bruska Jupiter 500 [5]

CNC bezhrotá bruska JUPITER 500 pro broušení vnějších průměrů je koncipována pro průchozí i zapichovací broušení. V konceptu stroje spojil JUNKER výhody metody bezhrotého broušení nakulato s přednostmi CBN-brousicích kotoučů, což díky dlouhé životnosti těchto kotoučů umožňuje podstatné zvýšení produkce, především při vysokém počtu kusů. Vedle těchto předností je třeba uvést současné využití brousicího kotouče po celé jeho šíři, čímž se výrazně snižují časy obrábění, a to jak ve velkosériové, tak v malosériové výrobě [5].

Dokončovací operace obrábění na strojích *STUDER* a *BUA 20* proběhly ve firmě ARGO-HYTOS a.s. a obrábění na bezhroté brusce proběhlo v podniku BSH Holice Ltd. V Holicích nejprve v rámci tamních experimentů na stroji, bylo náhodně nabroušeno 50 vzorků  $\varnothing 17,993 \pm 0,003$ , které jsem proměřil pasametrem a vybral 9 vzorků pro metrologii. Jelikož ani jeden ze vzorků nevyhověl rozměru  $17,996 - 0,001$ , byla do Holic o měsíc později poslána další série 14-ti vzorků, která již byla nabroušena na stanovený rozměr.

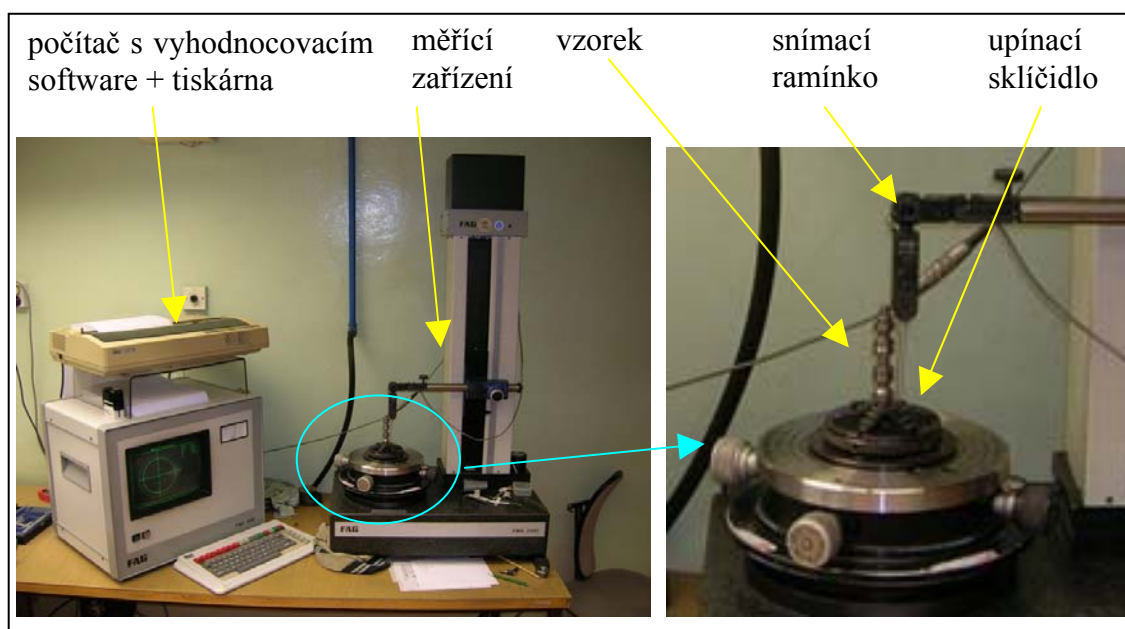


### 3.3 Realizace měření a vyhodnocení experimentu

Měření úchylek tvaru proběhlo v metrologické laboratoři firmy na kruhoměru *FAG FMS 2100* a měření objemových ztrát a hydrodynamických sil ve zkušebně firmy. Jak metrologie, tak i zkušebna jsou na podobná měření dostatečně vybavena.

#### 3.3.1 Měření úchylek tvaru

Toto měření proběhlo na kruhoměru *FAG FMS 2100* (obr. 37), který nyní spadá pod firmu *HOMEL CS s.r.o.*, která provádí jeho přezkoušení přesnosti.



Obr. 37. Kruhoměr FAG FMS 2100

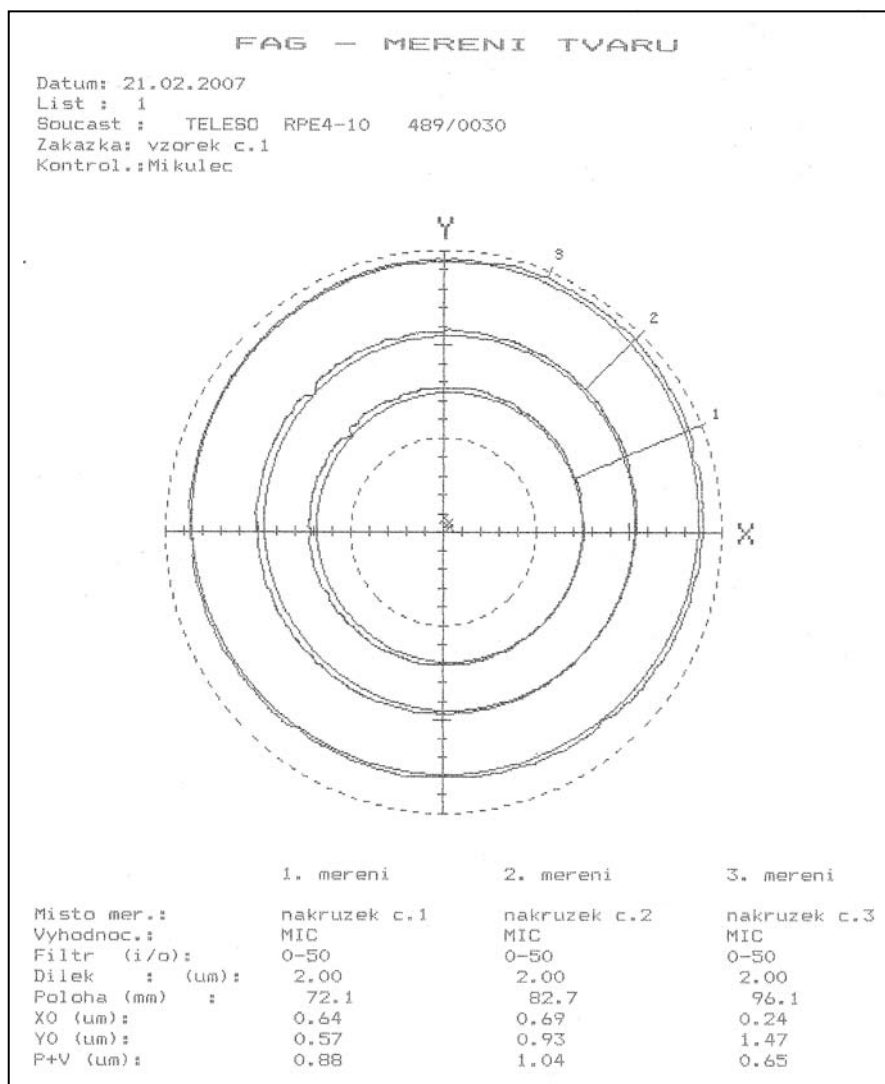
Před zahájením měření se součást, v našem případě těleso nebo šoupátko nejprve očistí lékařským benzinem a položí na pracovní stůl s vřetenem. Snímačem se najede na horní (první) nákržek a ručním otáčením vřetene se zajistí prvotní vyosenost měřené součásti. Potom se snímačem najede na spodní (šestý) nákržek a opět se ručním otáčením vřetene zajistí vyosenost. Tento postup se provádí tak dlouho, až se vyosenost mezi oběma koncovými nákržky vejde do měřicího rozsahu kruhoměru. Hodnoty vyosení jsou uloženy v softwaru a na výsledné hodnoty nemají vliv. Potom probíhá vlastní měření všech šesti nákržků. Po ukončení měření software vyhodnotí žádané úchyly tvaru, které je možno vytisknout (obr. 38, 39).

### 3.3.1.1 Měření úchylek kruhovitosti

Zásady měření kruhovitosti stanoví normy ISO 6318 Měření kruhovitosti. Názvy, definice a parametry kruhovitosti, ISO 4291 Metody hodnocení úchylek kruhovitosti; Měření změn poloměru a ISO 4291 Metody hodnocení úchylek kruhovitosti; Měření dvou a tříbodovou metodou [3].

Stanovení úchylky kruhovitosti lze provést:

- měřením změn poloměru,
  - měřicím dotekem otáčejícím se okolo stojící součásti,
  - stojícím dotekem a s rotující součástí,
- dvoubodovým měřením dvěma souosými dotečky,
- tříbodovým měřením dvěma pevnými a jedním pohyblivým dotekem [3].



Obr. 38. Záznam profilů kruhovitostí třech průřezů při měření válcovitosti tělesa na přístroji FAG FMS 2100

### 3.3.1.2 Měření úchylek válcovitosti

Pro měření úchylek válcovitosti lze použít buď přístrojů pro měření úchylek tvaru, nebo lze měřit na souřadnicovém měřicím zařízení, popř. lze použít úchylkoměrů nebo elektrického snímače a měřit mezi dvěma hroty, v nejjednodušším případě postačí i dvoubodové měřidlo průměrů. Vhodné je i použití měřidla s aerostatickým středěním měřeného válce.

Podmínkou pro aplikaci úplné měřicí metody úchylek válcovitosti je

- úplné proměření povrchu válcové plochy,
- stanovení obalového válce.

Měření lze uskutečnit buď spojitě nebo přerušovaně, tzv. krokovým způsobem měření.

Podle návrhu ČSN 01 4424 Základní pravidla zaměnitelnosti. Měření úchylek válcovitosti se pro měření válcovitosti užívají tyto postupy:

- měření radiálních řezů;
- měření povrchových přímk;
- měření po šroubovici;
- vyhodnocení metodou největších hodnot [3].

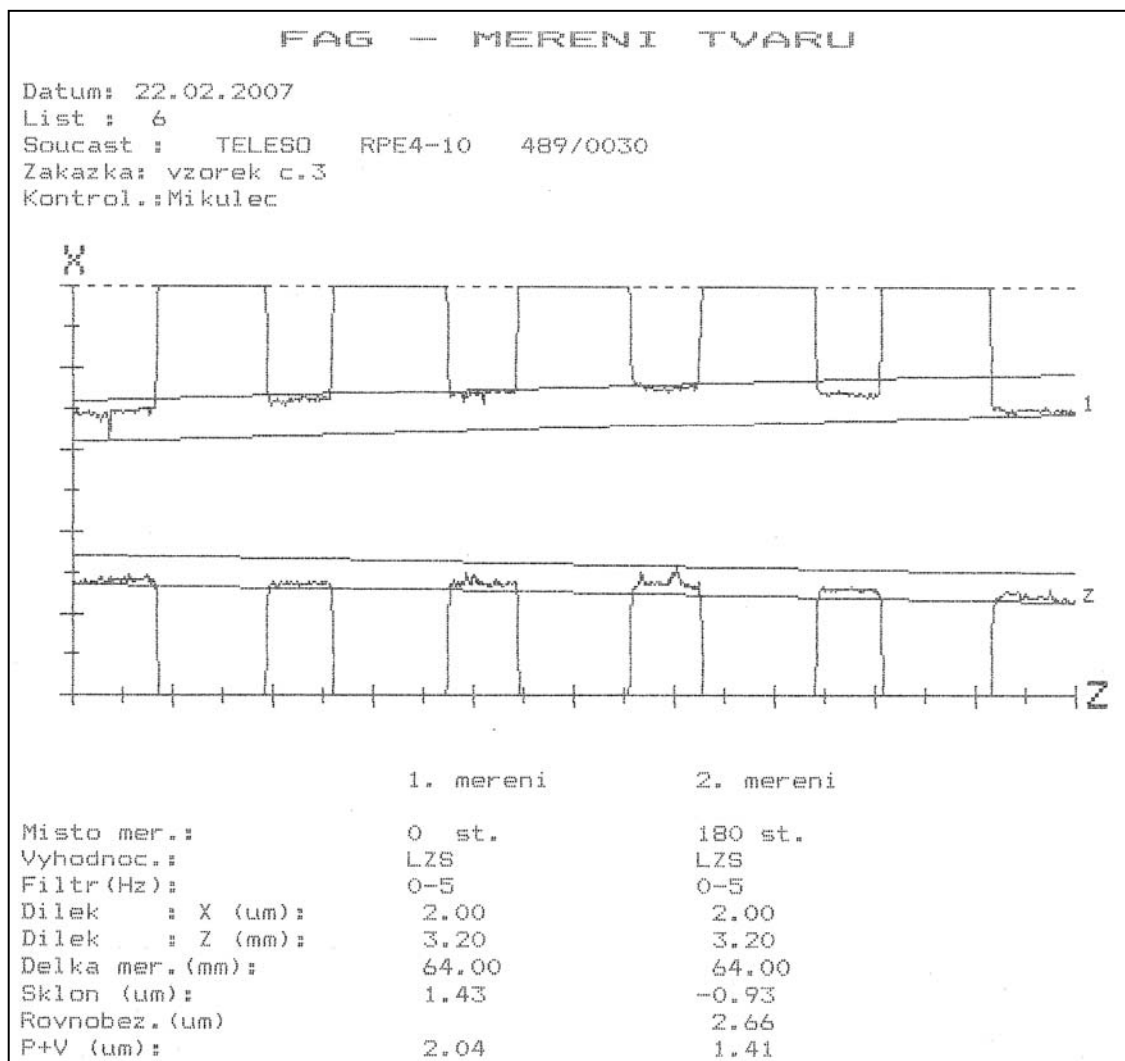
POZNÁMKA - Metody největších hodnot se užije, má-li se zjistit kromě úchylky válcovitosti také skutečný tvar povrchu. Má-li se ověřit pouze dodržení předepsané tolerance válcovitosti, může být použito kteréhokoliv z uvedených postupů měření.

Tab. 3. Nejmenší počty řezů, profilů a bodů při měření úchylek válcovitosti [3]

Postup měření	Způsob snímání	Nejmenší počet		
		řezů	profilů	bodů
radiálních řezů	spojitý	3	3	–
	přerušovaný	příčné	–	18
povrchových přímk	spojitý	3	6	–
	přerušovaný	osové	–	18
po šroubovici	spojitý	2 příčné a	3	–
	přerušovaný	1 šroubovitý	–	24
největších hodnot	spojitý	1 osový a	4	–
	přerušovaný	2 příčné	–	15

### 3.3.1.3 Měření úchylek profilu podélného řezu

Návrh ČSN 01 4425 *Základní pravidla zaměnitelnosti*. Měření úchylek profilu podélného řezu stanoví metody měření úchylek profilu podélného řezu; toleranci profilu podélného řezu uvádí pouze ČSN, není uvedena v mezinárodní normě. Obr. 32 ukazuje záznam z měřicího přístroje. Měření je totožné s měřením přímosti dvou protilehlých povrchů s tím, že se vyhodnocuje i rovnoběžnost obou povrchů [3].



Obr. 39. Záznam měření profilu podélného řezu válcovou plochou tělesa na přístroji FAG FMS 2100

### 3.3.1.4 Naměřené hodnoty

Zde jsou uvedeny nominální průměry a válcovitosti těles a šoupátek změřených v metrologické laboratoři. S výjimkou šoupátek vyrobených na stroji *JUPITER 500* (viz. str.38), jsou pod tabulkami graficky znázorněny četnosti jednotlivých nominálních průměrů.

Tab. 4. Vzorky tělesa rozváděče

<b>Těleso Ø18+0,002</b>		
<b>Číslo vzorku</b>	<b>Nominální průměr [mm]</b>	<b>Válcovitost [μm]</b>
1	18,002	3,0
2	18,002	2,0
3	18,002	2,0
4	18,002	2,7
5	18,002	2,2

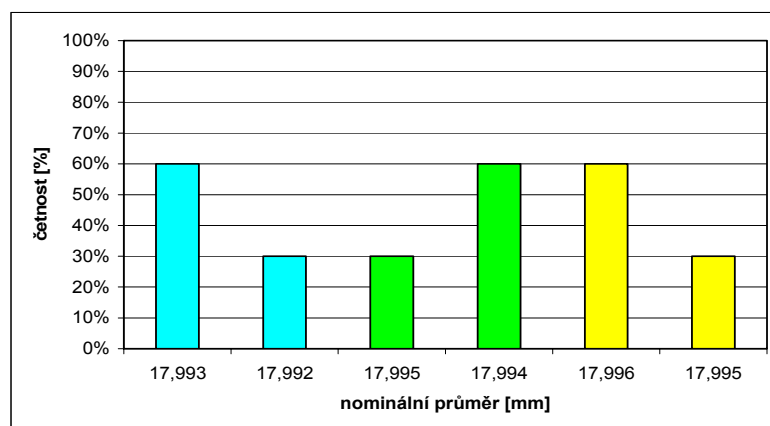
Z těchto vzorků byla vybrána pouze dvě vyhovující tělesa (č. 2 a záložní č. 3).

Tab. 5. Vzorky šoupátek vyrobených na stroji JUPITER 500

<b>JUPITER 500 Ø 17,993±0,003</b>		
<b>Číslo vzorku</b>	<b>Nominální průměr [mm]</b>	<b>Válcovitost [μm]</b>
1	17,994	1,54
2	17,994	1,68
3	17,994	1,52
4	17,994	1,56
5	17,993	1,10
6	17,994	1,55
7	17,991	1,33
8	17,991	1,22
9	17,991	1,90
<b>JUPITER 500 Ø 17,996-0,001</b>		
<b>Číslo vzorku</b>	<b>Nominální průměr [mm]</b>	<b>Válcovitost [μm]</b>
1	17,996	0,89
2	17,996	1,44
3	17,995	1,84
4	17,996	1,22
5	17,996	2,07
6	17,997	1,49
7	17,996	1,00
8	17,996	1,64
9	17,996	1,43
10	17,996	1,20
11	17,996	1,41
12	17,996	1,03
13	17,996	1,17
14	17,996	1,48

Tab. 6. Vzorky šoupátek vyrobených na stroji STUDER

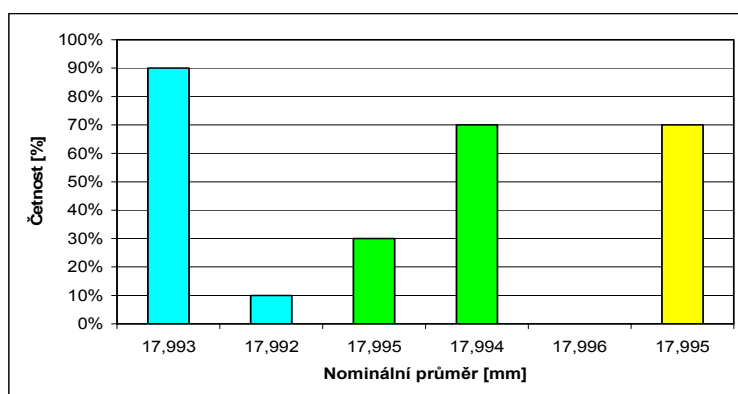
STUDER Ø 17,993-0,001		
Číslo vzorku	Nominální průměr [mm]	Válcovitost [μm]
1	17,993	1,48
2	17,993	1,45
3	17,992	1,05
4	17,993	1,49
5	17,992	1,40
6	17,993	1,11
7	17,993	1,16
8	17,993	1,10
9	17,991-17,993	2,43
10	17,992	1,15
STUDER Ø 17,995-0,001		
Číslo vzorku	Nominální průměr [mm]	Válcovitost [μm]
1	17,994	1,64
2	17,994	1,45
3	17,994	1,72
4	17,994	1,54
5	17,994	1,59
6	17,994	1,00
7	17,995	0,88
8	17,995	1,18
9	17,995	1,00
10	zmetek	
STUDER Ø 17,996-0,001		
Číslo vzorku	Nominální průměr [mm]	Válcovitost [μm]
1	17,996	0,81
2	17,996	0,95
3	17,995	1,30
4	17,996	1,49
5	17,995	1,22
6	17,996	1,15
7	17,996	1,00
8	17,995	1,65
9	17,996	1,00
10	zmetek	



Obr. 40. Četnosti jednotlivých nominálních rozměrů

Tab. 7. Vzorky šoupátek vyrobených na stroji BUA 20

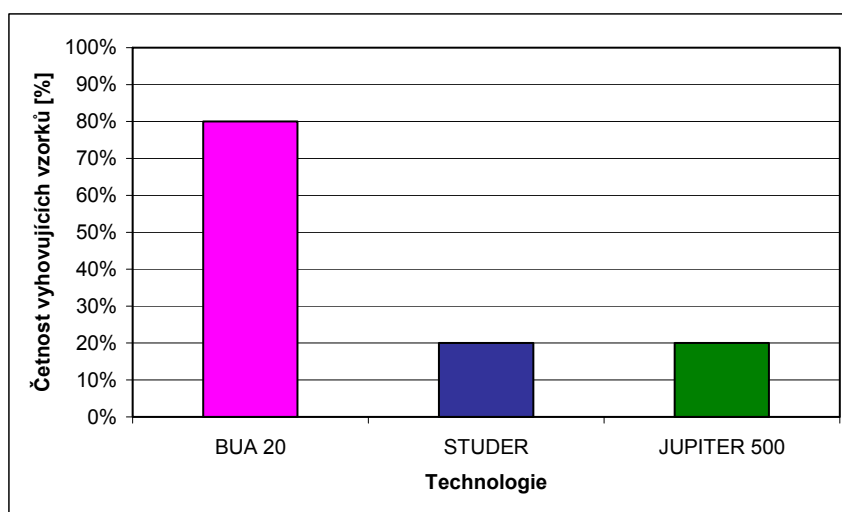
BUA 20 Ø 17,993-0,001		
Číslo vzorku	Nominální průměr [mm]	Válcovitost [μm]
1	17,993	0,83
2	17,993	0,82
3	17,992	0,59
4	17,993	0,50
5	17,993	0,53
6	17,993	0,89
7	17,993	0,62
8	17,993	0,62
9	17,993	0,89
10	17,993	1,55
BUA 20 Ø 17,995-0,001		
Číslo vzorku	Nominální průměr [mm]	Válcovitost [μm]
1	17,994	0,69
2	17,994	0,78
3	17,994	0,45
4	17,995	0,74
5	17,995	0,75
6	17,995	1,00
7	17,994	0,90
8	17,994	0,92
9	17,994	1,13
10	17,994	0,81
BUA 20 Ø 17,996-0,001		
Číslo vzorku	Nominální průměr [mm]	Válcovitost [μm]
1	17,995	0,98
2	17,995	0,91
3	17,995	0,89
4	17,994	0,90
5	17,994	0,51
6	17,995	1,00
7	17,995	1,09
8	17,995	1,11
9	17,994-17,996	3,14
10	17,995	1,14



Obr. 41. Četnosti jednotlivých nominálních rozměrů

Z naměřených hodnot nominálních průměrů šoupátek je zřejmé, že vzorky byly vyrobeny s téměř 100 % přesností. Zde je nutné si uvědomit, že hodnoty označené stejnou barvou na *obr. 40 a 41* se sčítají.

Jednotlivé technologie se od sebe lišily v hodnotách válcovitostí a v mnoha případech nevyhověli předepsané toleranci  $1\ \mu\text{m}$ . *Obrázek 42* znázorňuje procentuální dosažení předepsané válcovitosti u jednotlivých technologií.



Obr. 42. Četnosti vyhovujících válcovitostí u jednotlivých technologií

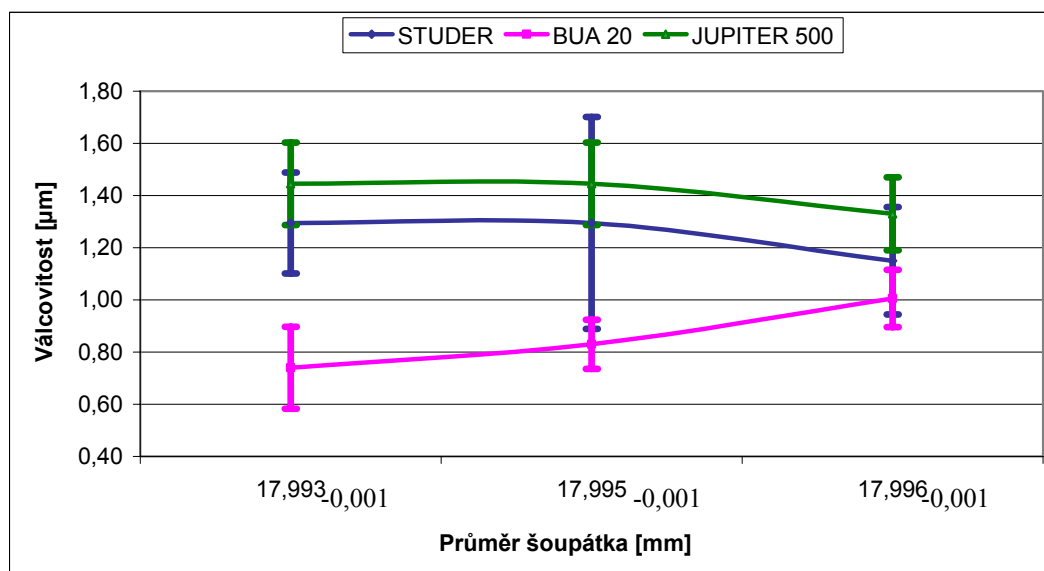
Zde je vidět, že v 80 % vyhověla konvenční bruska *BUA 20*, oproti 20 % CNC bruskám *STUDER* a *JUPITER 500*.

*Tab. 8* popisuje hodnoty válcovitostí pro jednotlivé průměry a technologie. Hodnoty byly vyhodnoceny statistickým programem *QCExpert* a jsou graficky znázorněny na *obr. 43*. Na něm jsou zobrazeny střední hodnoty válcovitostí, a k nim odpovídající intervaly spolehlivosti.



Tab. 8. Statistické vyhodnocení válcovitostí

Technologie	Průměr [mm]	Střední hodnota	Spodní mez [5%]	Horní mez [95%]	IS
STUDER	17,993-0,001	1,30	1,10	1,49	0,19
	17,995-0,001	1,30	0,89	1,70	0,41
	17,996-0,001	1,15	0,94	1,36	0,21
BUA 20	17,993-0,001	0,74	0,58	0,90	0,16
	17,995-0,001	0,83	0,74	0,92	0,09
	17,996-0,001	1,01	0,90	1,11	0,11
JUPITER 500	17,993-0,001	1,45	1,29	1,60	0,16
	17,995-0,001	1,45	1,29	1,60	0,16
	17,996-0,001	1,33	1,19	1,47	0,14

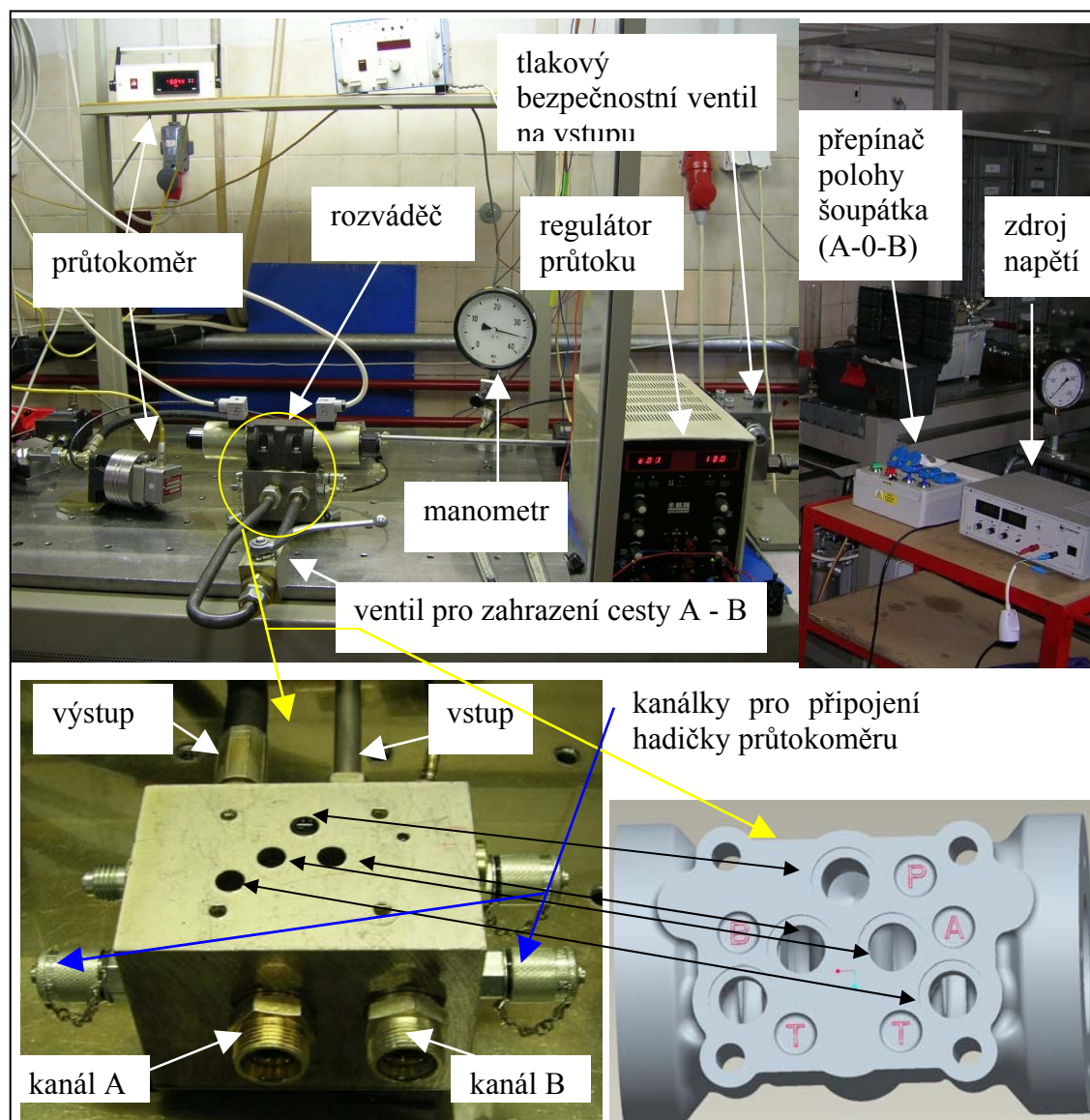


Obr. 43. Statistické vyhodnocení válcovitostí

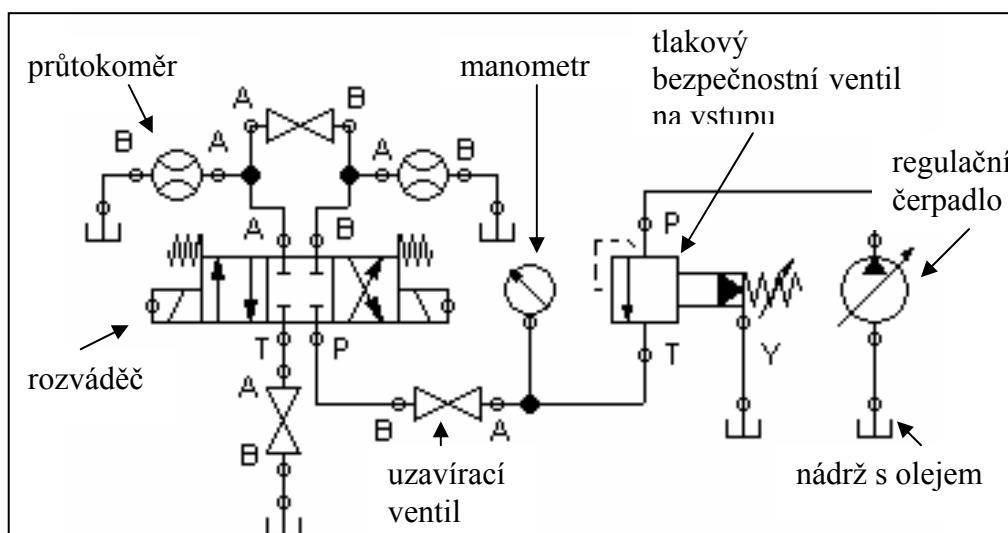
Zde je vidět, že intervaly spolehlivosti se ve větší míře překrývají u technologií *STUDER* a *JUPITER 500*, kde jsou vyšší hodnoty válcovitostí oproti *BUA 20*, kde jsou hodnoty nižší, což znamená, že obě technologie jsou si svými výsledky podobné. U průměru 17,996-0,001 můžeme konstatovat nejbližší schodu všech tří technologií.

### 3.3.2 Měření objemových ztrát

Měření proběhlo v prostorách zkušebny firmy na jednom ze zkušebních stavů. Pro měření byla použita zařízení, která jsou znázorněna a popsána na *obr. 44*, schématicky pak na *obr. 45*.



Obr. 44. Zkušební stav pro měření objemových ztrát + detaily připojení vstupů a výstupů rozváděče



Obr. 45. Schéma zkušebního stavu pro měření objemových ztrát

Ztrátový průtok (svodová propustnost) se měří v neutrální poloze šoupátka při zahrazených cestách *A* a *B*. Nejprve aktivujeme čerpadlo pro daný stav, které dodává hydraulický olej *OH-HM 32* (tab. 9) o teplotě  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do sestaveného obvodu.

Tab. 9. Fyzikálně - chemické vlastnosti oleje OH-HM 32 [6]

Hustota při $40^{\circ}\text{C}$ , $[\text{kg}/\text{m}^3]$	informativně	859
Kinematická viskozita při $40^{\circ}\text{C}$ , $[\text{mm}^2/\text{s}]$		32
Kinematická viskozita při $100^{\circ}\text{C}$ , $[\text{mm}^2/\text{s}]$	nejméně	5
Dynamická viskozita při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Brookfield), $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	nejvíce	2,5
Dynamická viskozita při $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Brookfield), $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$		0,02748
Viskozitní index	nejméně	95
Bod vzplanutí v o. t., $^{\circ}\text{C}$	nejméně	180
Bod tečení, $^{\circ}\text{C}$	nejvíce	-33
Deemulgační charakteristika při $54^{\circ}\text{C}$ , min	nejvíce	40

Jakmile obvodem protéká tekutina, nastavíme tlakovým ventilem v obvodu nízkou hodnotu tlaku *cca 2 MPa*, a 5 krát přestavíme rozváděč střídavě do polohy *A* a *B*. Pokud nastavíme vysokou hodnotu tlaku, bude rozváděč při přestavování rázově namáhán. Po přestavení se musí do jedné minuty začít měřit, jinak musíme začít znovu. Uzavřeme ventil mezi cestami *A* a *B* a připojíme hadičku průtokoměru na příslušný kanálek *A* nebo *B*. Do obvodu vpustíme tlak  $35\text{ MPa}$ , který odečteme na manometru a na průtokoměru odečteme číselnou hodnotu v litrech za minutu. V obvodu snížíme tlak na původní hodnotu, uvolníme ventil mezi cestami *A* a *B* a měření se může opakovat.

Měření jsem opakoval u každého vzorku 5 krát pro kanál *A* a 5 krát pro kanál *B*. Z naměřených hodnot jsem určil průměrnou hodnotu pro každý kanál a vybral tu větší, která charakterizuje objemovou ztrátu celého rozváděče. V průběhu měření docházelo ke zvyšování teploty oleje v nádrži, a proto bylo třeba tuto teplotu po každé pětici měření kontrolovat a regulovat zapínáním či vypínáním chlazení nádrže. Tímto vznikala odchylka od stanovené teplotní hodnoty  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Ze vzorků šoupátek jsem pro každý nominální průměr u každé technologie vybral šoupátka s největší, nejčtetnější a nejmenší válcovitostí. U těchto vzorků jsem změřil objemové ztráty.

### 3.3.2.1 Naměřené hodnoty

Zvýrazněné hodnoty válcovitostí v *tab. 10* na následující straně znamenají nejčtetnější válcovitosti u příslušných nominálních průměrů. U některých průměrů jsou uvedeny pouze dvě, nebo jen jedna hodnota válcovitosti. To znamená, že mezi vzorky byly jen nepatrné rozptyly a nejčtetnější hodnoty jsou tedy zároveň největšími, nejmenšími, nebo průměrnými hodnotami.

Tab. 10. Hodnoty objemových ztrát u vybraných vzorků

Technologie	D [mm]	Válcovitost [μm]	Vůle v [μm]	V [cm <sup>3</sup> /min] A	V [cm <sup>3</sup> /min] B	V max. [cm <sup>3</sup> /min]
STUDER	17,993	1,49	9	95	107	
				102	112	
				103	112	
				106	114	
				108	114	
				<b>Průměr :</b>	<b>102,8</b>	<b>111,8</b>
		1,10	9	112	105	
				114	106	
				117	109	
				117	110	
				117	110	
				<b>Průměr :</b>	<b>115,4</b>	<b>108</b>
BUA 20	17,993	1,55	9	119	113	
				120	117	
				124	117	
				124	116	
				125	117	
				<b>Průměr :</b>	<b>122,4</b>	<b>116</b>
		0,89	9	125	103	
				126	109	
				127	118	
				126	117	
				127	116	
				<b>Průměr :</b>	<b>126,2</b>	<b>112,6</b>
		0,50	9	132	130	
				135	132	
				133	131	
				136	133	
				135	132	
				<b>Průměr :</b>	<b>134,2</b>	<b>131,6</b>
JUPITER 500	17,993	1,10	9	100	90	
				102	86	
				101	89	
				101	87	
				102	89	
				<b>Průměr :</b>	<b>101,2</b>	<b>88,2</b>
	17,991	1,22	11	188	185	
				190	190	
				195	189	
				196	191	
				195	190	
				<b>Průměr :</b>	<b>192,8</b>	<b>189</b>
		1,90	11	192	165	
				194	170	
				195	166	
				193	167	
				194	169	
				<b>Průměr :</b>	<b>193,6</b>	<b>167,4</b>

<b>Technologie</b>	<b>D [mm]</b>	<b>Válcovitost [μm]</b>	<b>Vůle v [μm]</b>	<b>V [cm3/min] A</b>	<b>V [cm3/min] B</b>	<b>V max. [cm3/min]</b>
STUDER	17,994	1,72	8	74	77	
				75	78	
				77	80	
				76	80	
				76	81	
			<b>Průměr :</b>	<b>75,6</b>	<b>79,2</b>	<b>79,2</b>
		1,00	8	72	73	
				73	77	
				73	77	
				72	76	
				72	75	
			<b>Průměr :</b>	<b>72,4</b>	<b>75,6</b>	<b>75,6</b>
	17,995	1,00	7	60	60	
				63	61	
				63	62	
				61	61	
				62	62	
			<b>Průměr :</b>	<b>61,8</b>	<b>61,2</b>	<b>61,8</b>
BUA 20	17,994	0,92	8	62	60	
				64	60	
				64	61	
				65	60	
				65	62	
			<b>Průměr :</b>	<b>64</b>	<b>60,6</b>	<b>64</b>
		0,45	8	74	74	
				75	74	
				76	74	
				75	73	
				76	73	
			<b>Průměr :</b>	<b>75,2</b>	<b>73,6</b>	<b>75,2</b>
		0,81	8	64	63	
				64	62	
				62	63	
				63	65	
				64	61	
			<b>Průměr :</b>	<b>63,4</b>	<b>62,8</b>	<b>63,4</b>
	17,995	1,00	7	62	60	
				62	61	
				64	60	
				63	62	
				63	62	
			<b>Průměr :</b>	<b>62,8</b>	<b>61</b>	<b>62,8</b>
JUPITER 500	17,994	1,52	8	100	87	
				106	89	
				103	91	
				105	90	
				104	89	
			<b>Průměr :</b>	<b>103,6</b>	<b>89,2</b>	<b>103,6</b>

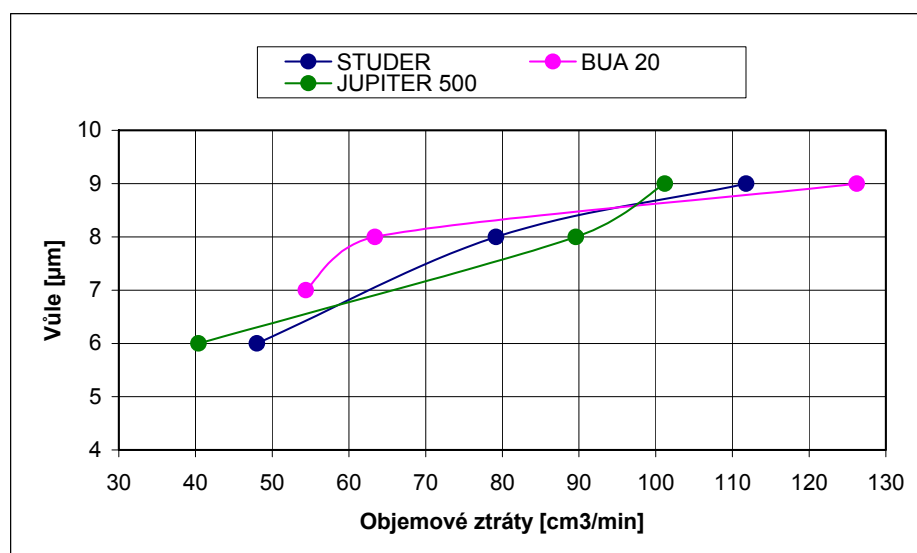
<b>Technologie</b>	<b>D [mm]</b>	<b>Válcovitost [μm]</b>	<b>Vůle v [μm]</b>	<b>V [cm<sup>3</sup>/min] A</b>	<b>V [cm<sup>3</sup>/min] B</b>	<b>V max. [cm<sup>3</sup>/min]</b>
JUPITER 500	17,994	1,54	8	84	74	
				94	80	
				89	79	
				90	80	
				91	81	
			<b>Průměr :</b>	<b>89,6</b>	<b>78,8</b>	<b>89,6</b>
STUDER	17,996	1,49	6	47	49	
				49	50	
				48	48	
				49	49	
				50	49	
			<b>Průměr :</b>	<b>48,6</b>	<b>49</b>	<b>49</b>
		1,00	6	47	41	
				48	42	
				48	42	
				49	42	
				48	43	
			<b>Průměr :</b>	<b>48</b>	<b>42</b>	<b>48</b>
	17,995	1,20	7	52	51	
				52	51	
				53	52	
				53	51	
				53	52	
			<b>Průměr :</b>	<b>52,6</b>	<b>51,4</b>	<b>52,6</b>
BUA 20	17,995	0,89	7	54	52	
				54	52	
				54	53	
				55	53	
				55	53	
			<b>Průměr :</b>	<b>54,4</b>	<b>52,6</b>	<b>54,4</b>
JUPITER 500	17,996	1,64	6	39	35	
				39	36	
				39	36	
				39	35	
				39	36	
			<b>Průměr :</b>	<b>39</b>	<b>35,6</b>	<b>39</b>
		1,20	6	40	32	
				40	33	
				41	32	
				41	33	
				40	34	
			<b>Průměr :</b>	<b>40,4</b>	<b>32,8</b>	<b>40,4</b>
		0,89	6	47	42	
				48	43	
				48	43	
				49	44	
				49	43	
			<b>Průměr :</b>	<b>48,2</b>	<b>43</b>	<b>48,2</b>

Obr. 46 popisuje vliv vůlí na objemové ztráty. Zde je vidět, že s klesající vůlí rapidně klesají i objemové ztráty. Šoupátka vyrobená technologiemi *STUDER* a *JUPITER 500* vykazují při stejných vůlích velmi podobné hodnoty objemových ztrát. Šoupátka vyrobená technologií *BUA 20* se od nich podstatně liší v rozmezí vůlí 8 a 9  $\mu\text{m}$ , kde je rozdíl v objemových ztrátách přibližně 2 krát větší.

Víme, že technologie *BUA 20* vykazuje lepší válcovitosti (viz. obr. 42, str. 46), než zbylé dvě technologie. Můžeme tedy říci, že horší válcovitost vykazuje při stejném uložení s vůlí menší objemové ztráty. Znamená to, že v měřeném místě tedy mezi kanály *P-A* a *P-B* nedojde k excentrickému uložení.

Při běžné výrobě se rozváděče ve firmě vyrábí v rozmezí minimální vůle 7  $\mu\text{m}$  a maximální vůle 11  $\mu\text{m}$ . Při maximální vůli jsou objemové ztráty při tlaku 35 MPa okolo 190  $\text{cm}^3/\text{min}$  (tab. 10) a při minimální vůli okolo 60  $\text{cm}^3/\text{min}$ , což je přibližně 3 krát méně. Při takovémto tlaku je tedy znatelné snížení vůle o každý 1  $\mu\text{m}$ , což znamená objemovou ztrátu asi 30  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

U technologie *BUA 20* byla šoupátka vyrobená s nejmenší vůlí 7  $\mu\text{m}$  (také odpovídá zadání) namísto 6  $\mu\text{m}$ , jak tomu bylo u zbývajících dvou technologií.

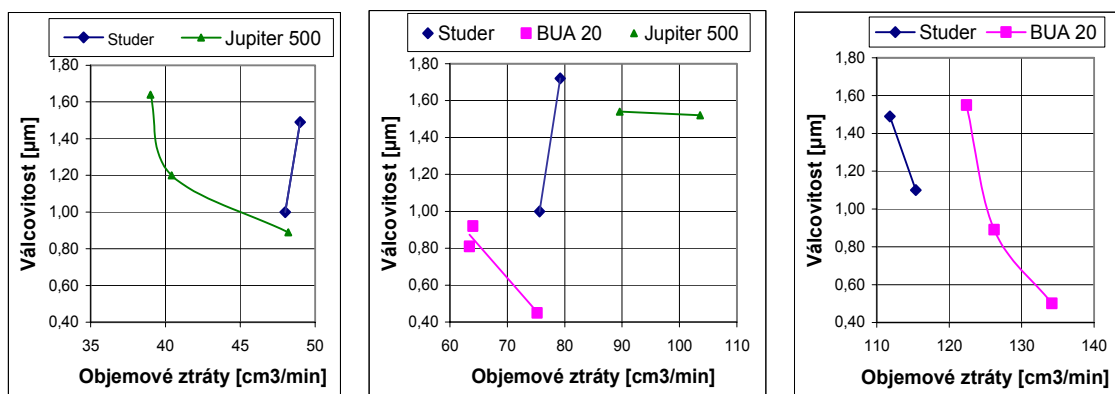


Obr. 46. Vliv vůlí jednotlivých technologií na objemové ztráty



Obr. 47 popisuje vliv válcovitostí při různých vřích uložení na objemové ztráty. U obr. 47a, 47c jsou zobrazeny pouze dvě technologie, protože u chybějící třetí nebyly mezi vzorky při stejných nominálních průměrech různé válcovitosti.

Zde se nedá s určitostí říci, zda má menší, či větší válcovitost vliv na menší, či větší objemové ztráty. Můžeme pouze říci, že v některých případech měla větší válcovitost za následek menší objemové ztráty. Z počtu zobrazených křivek je to 5:2.



a) vřle 6 [μm]

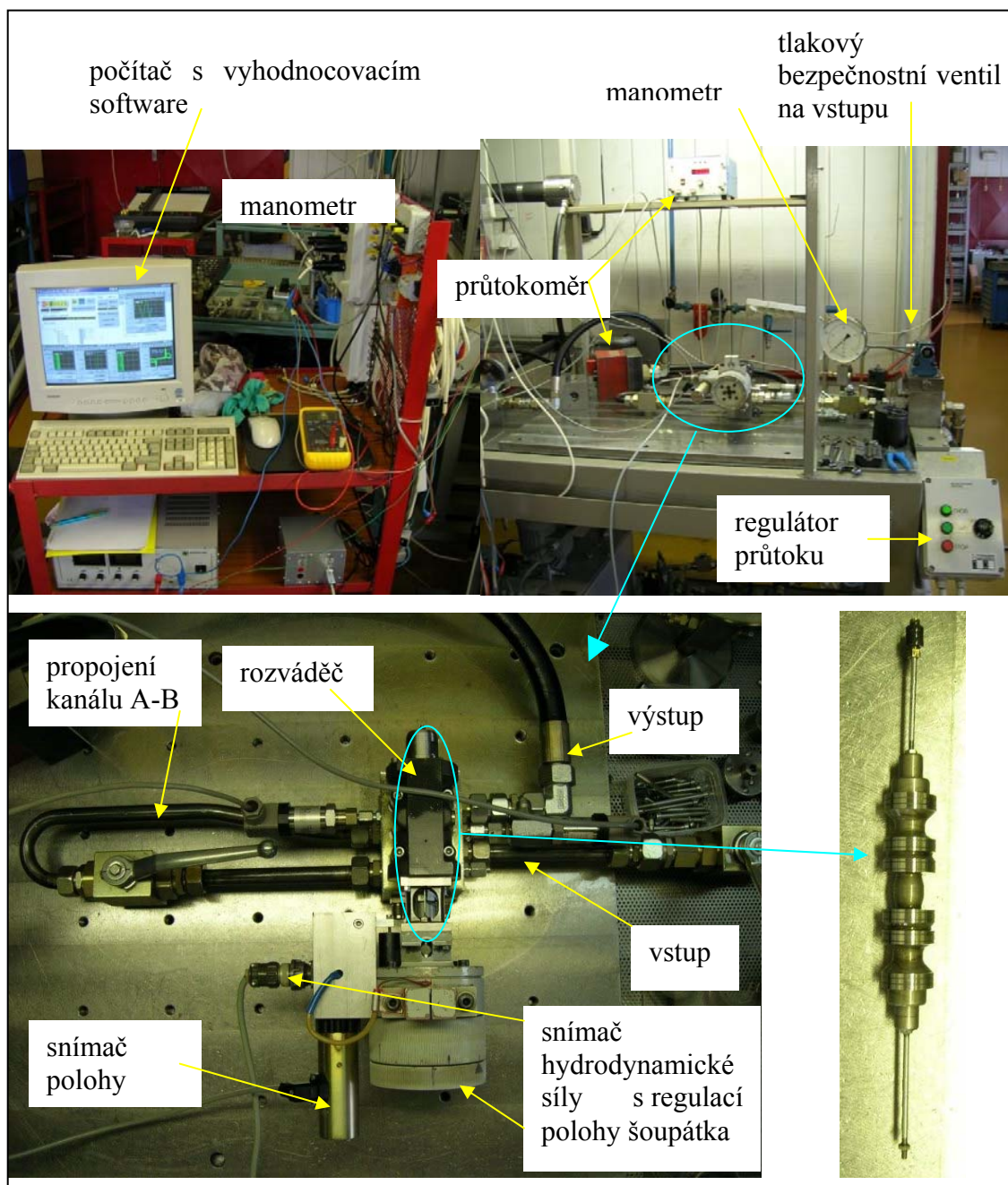
b) vřle 8 [μm]

c) vřle 9 [μm]

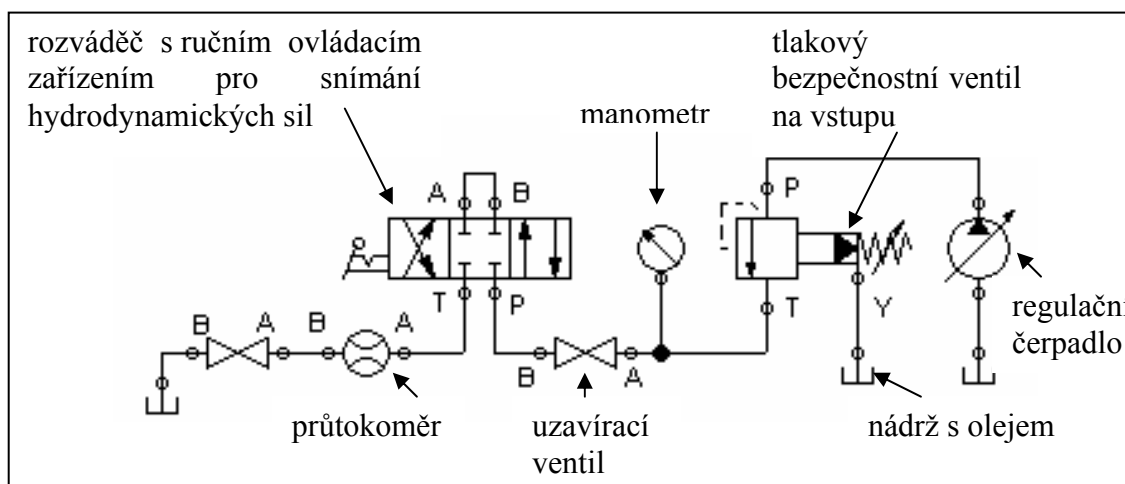
Obr. 47. Vliv válcovitostí jednotlivých technologií na objemové ztráty

### 3.3.3 Měření hydrodynamických sil

Měření proběhlo v prostorách zkušebny firmy na jednom ze zkušebních stavů. Pro měření byla použita zařízení, která jsou znázorněna a popsána na *obr. 48*, schématicky pak na *obr. 49*. Pro toto měření byla šoupátka z obou stran opatřena závity  $M 2$  pro našroubování táhel potřebných k regulaci polohy (*obr. 48* - detail).



Obr. 48. Zkušební stav pro měření hydrodynamických sil + detail měřícího zařízení a šoupátka s táhly pro regulaci posuvu

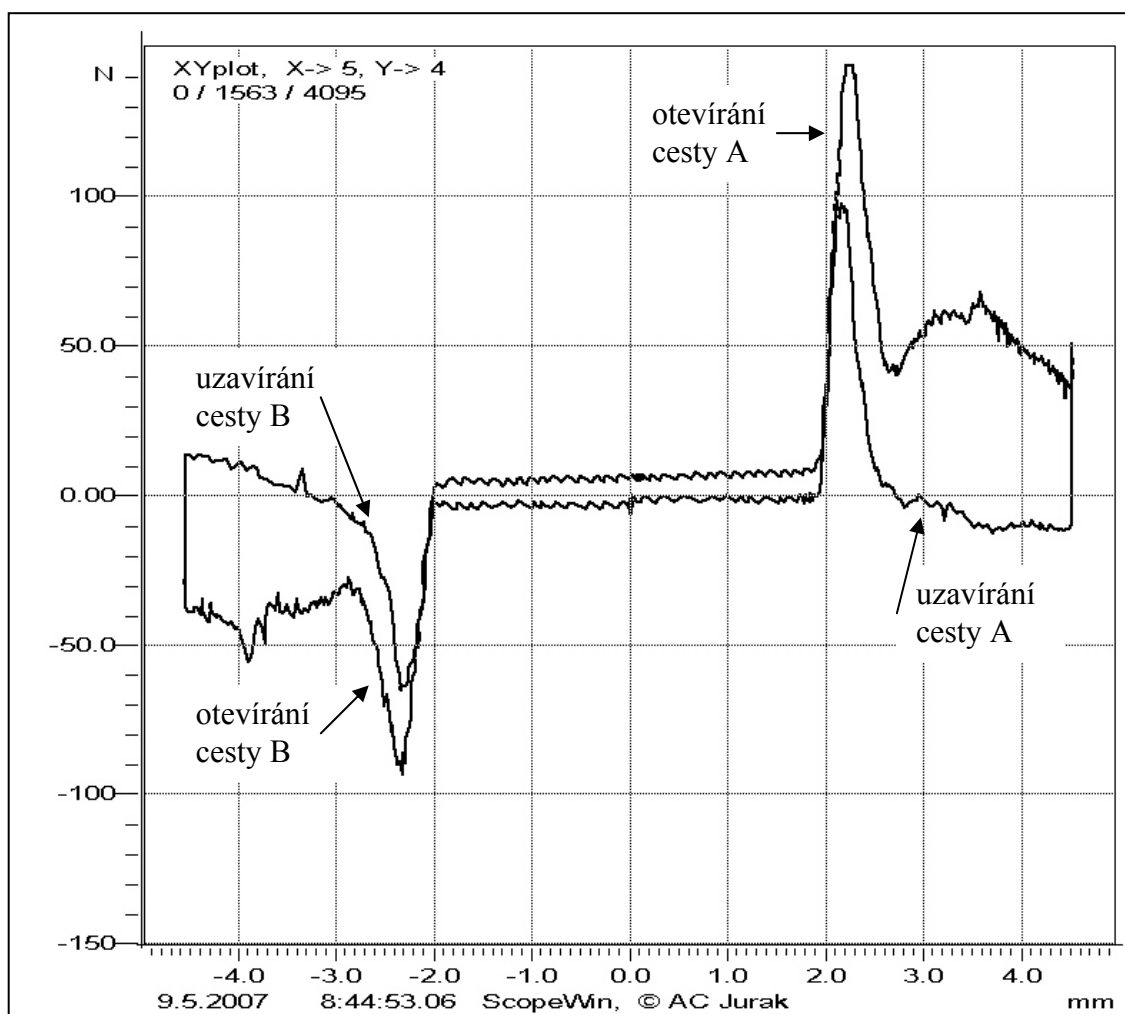


Obr. 49. Schéma zkušebního stavu pro měření hydrodynamických sil

Hydrodynamické síly měříme při maximálním průtoku  $140 \text{ l/min}$  a tlaku  $35 \text{ MPa}$ . Nejprve aktivujeme čerpadlo pro daný stav, které dodává hydraulický olej *OH-HM 32* (viz. tab. 9) o teplotě  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  do sestaveného obvodu (pro dosažení takto vysokého průtočného množství bylo zapotřebí aktivovat čtyři čerpadla). Šoupátko ručně přestavíme zařízením pro snímání hydrodynamických sil (jedna otáčka odpovídá posuvu šoupátka o  $1 \text{ mm}$ ) do polohy *A* a nastavíme průtok  $140 \text{ l/min}$ . Potom šoupátko vrátíme zpět do neutrální polohy a nastavíme tlak  $35 \text{ MPa}$ . V tomto okamžiku začíná měření. Šoupátko střídavě přestavíme do polohy *A* a *B* při zdvihu  $4,5 \text{ mm}$  na každou stranu a znovu jej vrátíme do neutrální polohy. Tím měření končí. Průběhy hydrodynamických sil jsou zaznamenávány a vykreslovány softwarem *ScopeWin 96* v závislosti na posunutí šoupátka, jak vidíme na obr. 50.

Zařízení pro měření hydrodynamické síly bylo kalibrováno tlakovou silou. Proto při přestavování do polohy *A* jsou na obr. 50 hodnoty kladné (šoupátko tlačíme), a při přestavování do polohy *B* jsou hodnoty záporné (šoupátko táhneme).

### 3.3.3.1 Naměřené hodnoty



Obr. 50. Závislost hydrodynamické síly na poloze šoupátka (*STUDER*  $v = 8 \mu\text{m}$ )

Hydrodynamické síly byly změřeny u stejných vzorků jako objemové ztráty. Tedy technologie *JUPITER 500*, *STUDER*, *BUA 20* a vůle 6, 8, 9  $\mu\text{m}$  (u technologie *BUA 20* nejmenší vůle 7  $\mu\text{m}$ ). Z jednotlivých výsledků viz. příloha 2, nejsou zřejmé téměř žádné odchylky mezi jednotlivými měřeními. Vliv geometrie se tedy v tomto případě nepotvrdil. Jisté nepatrné změny můžeme pozorovat u technologie *JUPITER 500*, kde se zvyšující se vůlí klesá hydrodynamická síla, ovšem u technologie *STUDER* je tomu naopak. U technologie *BUA 20* nejsou znatelné žádné změny.

## 4 POROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A EXPERIMENTÁLNÍCH HODNOT

### 4.1 Objemové ztráty

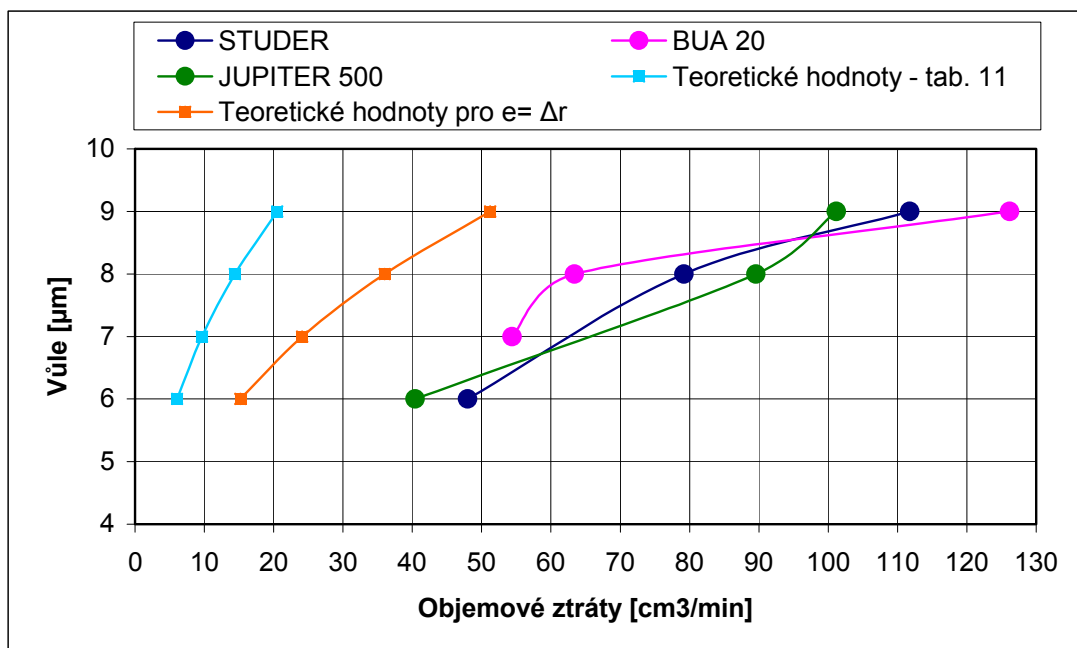
Pro teoretický výpočet objemových ztrát vycházíme ze vztahu (2, str. 18):

$$Q_c = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta r^3}{12 \cdot \eta \cdot x_0} \cdot \left[ 1 + 1,5 \cdot \left( \frac{e}{\Delta r} \right)^2 \right] \cdot p_p$$

do kterého dosadíme hodnoty dle *tab. 11*. Výpočet provedeme jednak pro nulovou excentricitu  $e$  a jednak pro excentricitu rovnou funkční vůli  $\Delta r$ . Výsledné hodnoty jsou spolu s experimentálními zobrazeny na *obr. 51*.

Tab. 11. Teoretické hodnoty

Obj. ztráta $Q_c$ [cm <sup>3</sup> /min]	Průměr šoupátka $D$ [mm]	vůle $v$ [μm]	dyn. visk. $\eta$ [Pa*s]	Pozitivní krytí $x_0$ [mm]	Vstupní tlak $P_p$ [MPa]	excentricita $e$ [μm]
21	17,993	9	0,02748	1,6	35	0
14	17,994	8	0,02748	1,6	35	0
10	17,995	7	0,02748	1,6	35	0
6	17,996	6	0,02748	1,6	35	0
<b>Excentricky uložené šoupátko</b>						
51	17,993	9	0,02748	1,6	35	4,5
36	17,994	8	0,02748	1,6	35	4
24	17,995	7	0,02748	1,6	35	3,5
15	17,996	6	0,02748	1,6	35	3



Obr. 51. Porovnání teoretických a experimentálních hodnot vlivu vůlí na objemové ztráty

Z obr. 51 je jasné vidět, že se teoretické hodnoty (modrá barva) neshodují s experimentálními a to ani u excentricky uloženého šoupátka (oranžová barva). Tato skutečnost zřejmě vyplývá z nedokonalé geometrie. Teoretické vztahy totiž vycházejí z ideálních kružnic a nezahrnují tak vlivy úchylek tvaru. Těmi jsou v tomto případě kruhovitost a válcovitost (kapitola 2.2.2, příloha 1). U kruhovitosti to potom může být např. ovalita nebo hranolovitost. Válcovitost zase souvisí s excentricitou. Nejhorším případem by potom bylo excentricky uložené oválné, či hranolovité šoupátko.

Mezi další parametry, které mohou mít vliv na výše uvedené odchylky patří překrytí hran a dynamická viskozita. Velikost překrytí hran nemusí odpovídat předepsaným hodnotám a může být snížena např. nepřesnou výrobou, nebo během chodu rozváděče vydrolením, či zaoblením funkčních hran. Viskozita zase závisí na teplotě, která se může zvýšit vlivem proudění skrz mezeru mezi šoupátkem a tělesem.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na zjišťování vlivu vůle a geometrie dvojice šoupátka těleso na svodovou propustnost (objemové ztráty) a hydrodynamické síly rozváděče *RPE4-10* fy ARGO-HYTOS, a.s. ve Vrchlabí.

Na základě experimentu můžeme říci, že na snížení objemových ztrát má největší vliv snížení vůle. Při běžné výrobě se rozváděče ve firmě vyrábí v rozmezí maximální vůle  $11\ \mu\text{m}$  a minimální vůle  $7\ \mu\text{m}$ . Při maximální vůli jsou objemové ztráty při tlaku  $35\ \text{MPa}$  okolo  $190\ \text{cm}^3/\text{min}$  a při minimální vůli okolo  $60\ \text{cm}^3/\text{min}$ , což je zhruba 3 krát méně. Při takovémto tlaku je tedy znatelné snížení vůle o každý  $1\ \mu\text{m}$ , což znamená objemovou ztrátu přibližně  $30\ \text{cm}^3/\text{min}$ .

Vliv větší, nebo menší válcovitosti na snížení objemových ztrát se u zkoumaných vzorků jednoznačně nepotvrdil. Hodnoty válcovitostí kolísaly v rozmezí  $0,58 - 1,70\ \mu\text{m}$  při nominálních průměrech  $17,992 - 17,996\ \text{mm}$  souhrnně pro všechny tři technologie broušení šoupátek. Válcovitost tělesa pro nominální průměr  $18,002\ \text{mm}$  kolísala v rozmezí  $2 - 3\ \mu\text{m}$ .

Co se týče přesnosti výroby šoupátek, tak jako nejpřesnější se ukázala technologie broušení na konvenční brusce *BUA 20*, kde předepsané toleranci válcovitosti  $1\ \mu\text{m}$  vyhovělo cca 80 % vzorků. Ovšem tato technologie je vhodná spíše pro kusovou výrobu. U technologie *STUDER* a *JUPITER 500* bylo dosaženo pouze cca 20 % úspěšnosti při dané válcovitosti. Obě tyto technologie vykazují podobné hodnoty válcovitostí, které nepřesahují hodnotu  $2\ \mu\text{m}$ .

Byl zkoumán i vliv geometrie na hydrodynamické síly. Ani zde se různé vůle a válcovitosti neprojeví na změně hydrodynamické síly. Zde by bylo na místě vyrobit šoupátka s různým překrytím a prozkoumat jejich vliv, protože hydrodynamická síla vzrůstá až při negativním překrytí a závisí na velikosti posunutí šoupátka.

## Navrhovaná opatření

- Při výrobě šoupátka i tělesa nemá smysl předepisovat hodnoty válcovitostí  $1\ \mu m$ , protože stávající technologie zařazená do sériové výroby v těchto přesnostech nevyrábí. Stávající předepsané válcovitosti  $2\ \mu m$  jsou objektivní.

- Zvětšit průměr šoupátka z  $17,993-0,002\ mm$  na  $17,995-0,002\ mm$ , tedy z původní střední vůle  $9\ \mu m$  na  $7\ \mu m$  u nějaké četnější série a rozváděče odzkoušet, zda vlivem nižších vůlí nedojde k uvíznutí šoupátka v tělese.



## **6 POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] [www.argo-hytos.com](http://www.argo-hytos.com)
- [2] Doc. Ing. JOSEF CERHA, Csc. : Hydraulické a pneumatické mechanismy I. Technická univerzita v Liberci, 2006
- [3] FRANTIŠEK DRASTÍK: Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. Montanex, Ostrava 1996
- [4] <http://www.studer.com/redwork/do.php?node=2141758875&layoutid=405&language=2>
- [5] [http://www.junker-group.com/csy/231\\_253.aspx](http://www.junker-group.com/csy/231_253.aspx)
- [6] <http://www.madit.sk/index.php?id=1004&pid=50>
- [7] [http://www.oleje.cz/index.php?left=tabulky&page=dalsi\\_tabulky](http://www.oleje.cz/index.php?left=tabulky&page=dalsi_tabulky)
- [8] ARGO-HYTOS a.s., Vrchlabí: Příručka hydrauliky, 2007

## **7 Seznam příloh**

**Příloha I. Grafy kruhovitostí vybraných čtyř šoupátek  
v souvislosti s vlivem na objemové ztráty**

**Příloha II. Grafy hydrodynamických sil pro jednotlivé  
technologie a jednotlivé vůle**

**Příloha III. Výkresová dokumentace tělesa a šoupátka rozváděče  
RPE4-10**

## **1 Seznam příloh**

**Příloha I. Grafy kruhovitostí vybraných čtyř šoupátek  
v souvislosti s vlivem na objemové ztráty**

**Příloha II. Grafy hydrodynamických sil pro jednotlivé  
technologie a jednotlivé vůle**

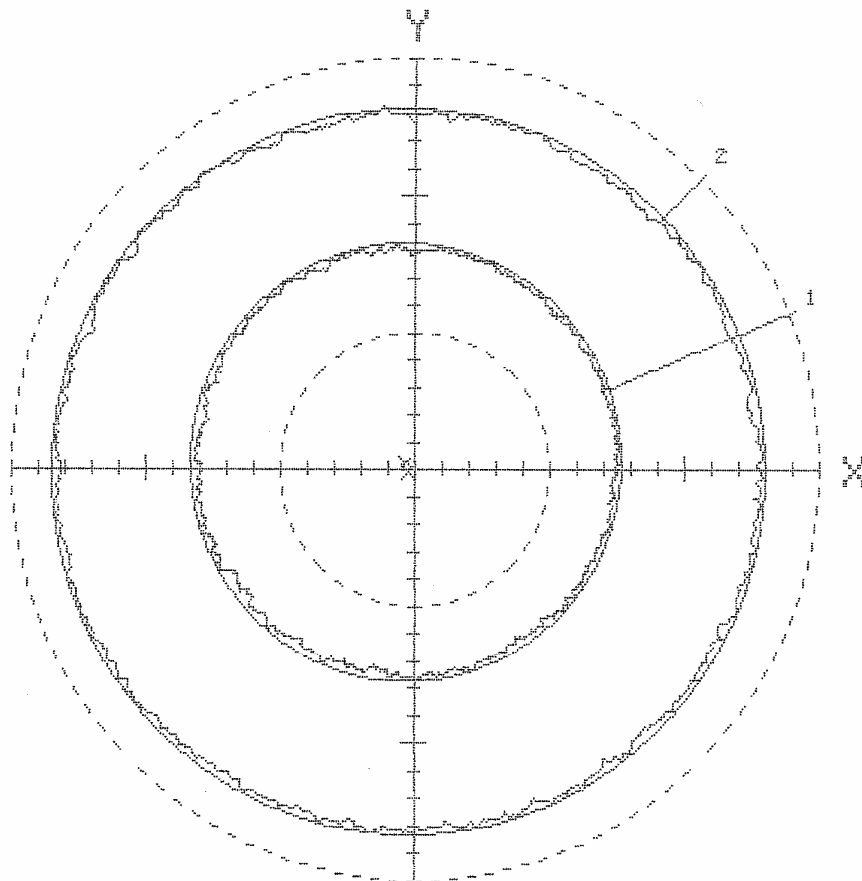
**Příloha III. Výkresová dokumentace tělesa a šoupátka rozváděče  
RPE4-10**

**Příloha I. Grafy kruhovitostí vybraných čtyř šoupátek  
v souvislosti s vlivem na objemové ztráty**

STUDER - vůle 9  $\mu\text{m}$ , válcovitost 1,49  $\mu\text{m}$ ,  $Q_c = 111,8 \text{ cm}^3/\text{min}$

## FAG – MĚŘENÍ TVARU

Datum: 18.5.2007  
List : 1  
Součást : Soupatko  
Zakázka: kus c.4 – 1S  
Kontrol.: Smolik



1. měření

2. měření

Místo měř.:

Vyhodnoc.:

Filtr (i/o):

Dílek : ( $\mu\text{m}$ ):

Poloha (mm) :

X0 ( $\mu\text{m}$ ):

Y0 ( $\mu\text{m}$ ):

P+V ( $\mu\text{m}$ ):

MCC

0-500

1.00

68.3

-0.36

0.23

0.58

MCC

0-500

1.00

81.3

-0.29

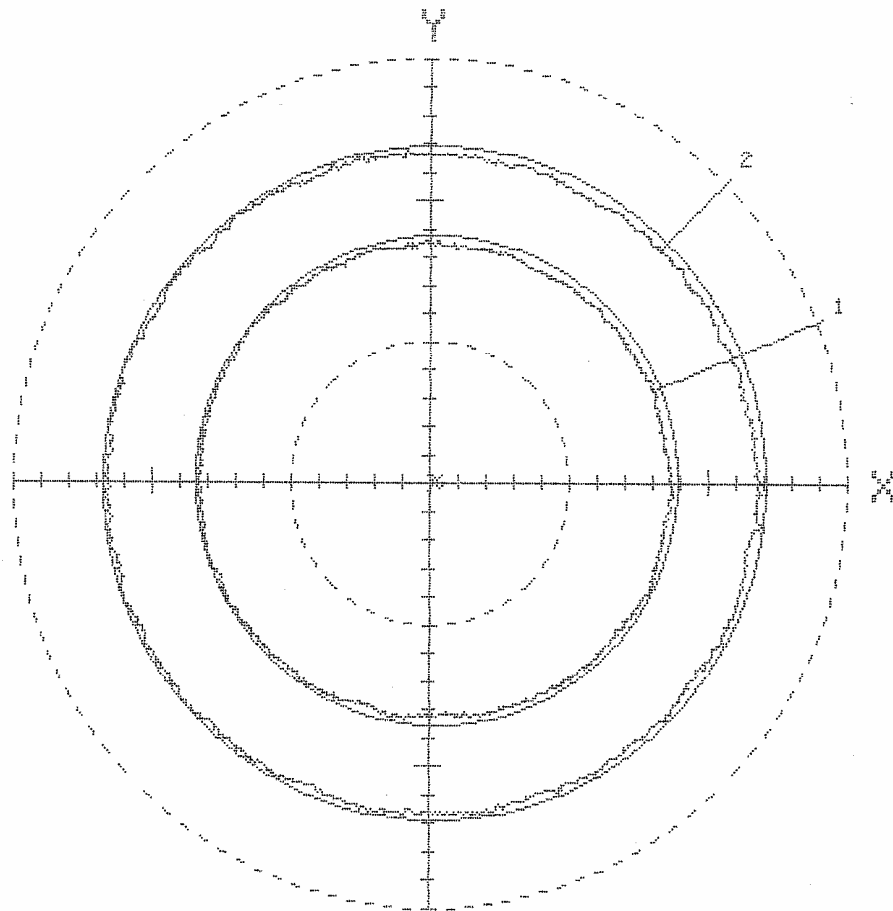
-0.04

0.56

BUA 20 - vůle 9  $\mu\text{m}$ , válcovitost 1,55  $\mu\text{m}$ ,  $Q_c = 122,4 \text{ cm}^3/\text{min}$

# FAG — MERENÍ TVARU

Datum: 18.5.2007  
List : 2  
Součást : Soupatko  
Zakazka: kus c.5 - 2B  
Kontrol.: Smolik



1. mereni

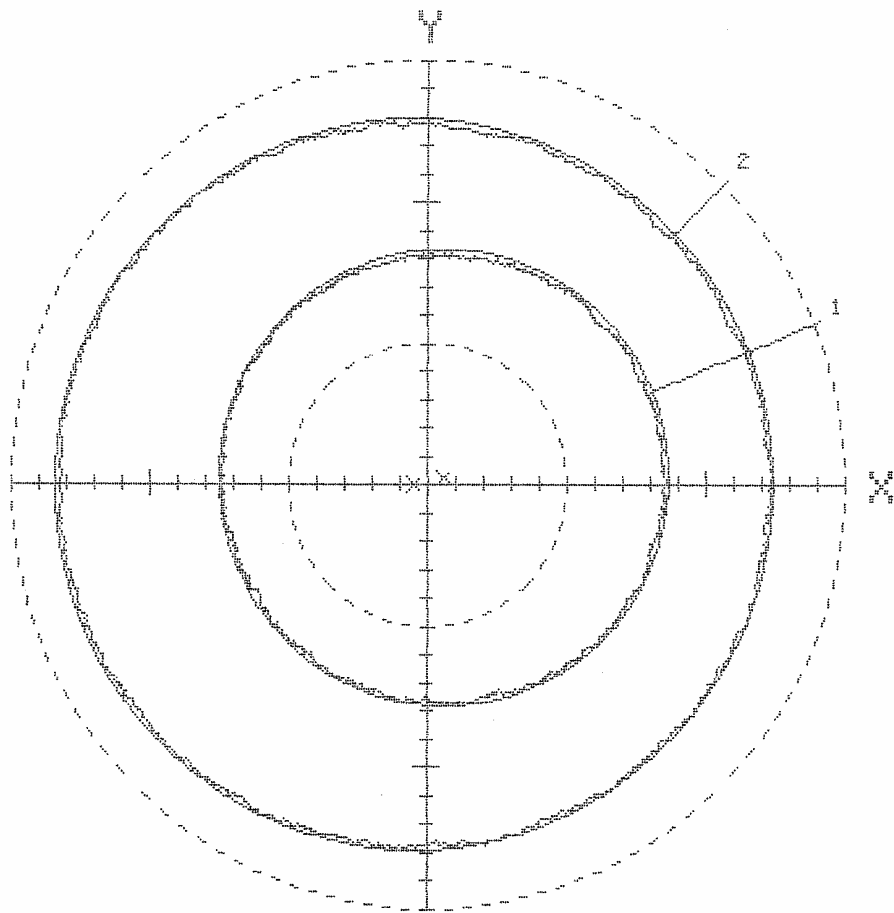
2. mereni

Misto mer.:		
Vyhodnoc.:	MCC	MCC
Filtr (i/o):	0-500	0-500
Dilek : ( $\mu\text{m}$ ):	1.00	1.00
Poloha (mm) :	68.3	81.3
X0 ( $\mu\text{m}$ ):	0.21	0.15
Y0 ( $\mu\text{m}$ ):	0.08	0.00
P+V ( $\mu\text{m}$ ):	0.44	0.52

BUA 20 - vůle 9  $\mu\text{m}$ , válcovitost 0,5  $\mu\text{m}$ ,  $Q_c = 134,2 \text{ cm}^3/\text{min}$

## FAG – MERENÍ TVARU

Datum: 18.5.2007  
List : 3  
Součást : Soupatko  
Zakazka: kus c.4 – 1B  
Kontrol.: Smolik



1. mereni

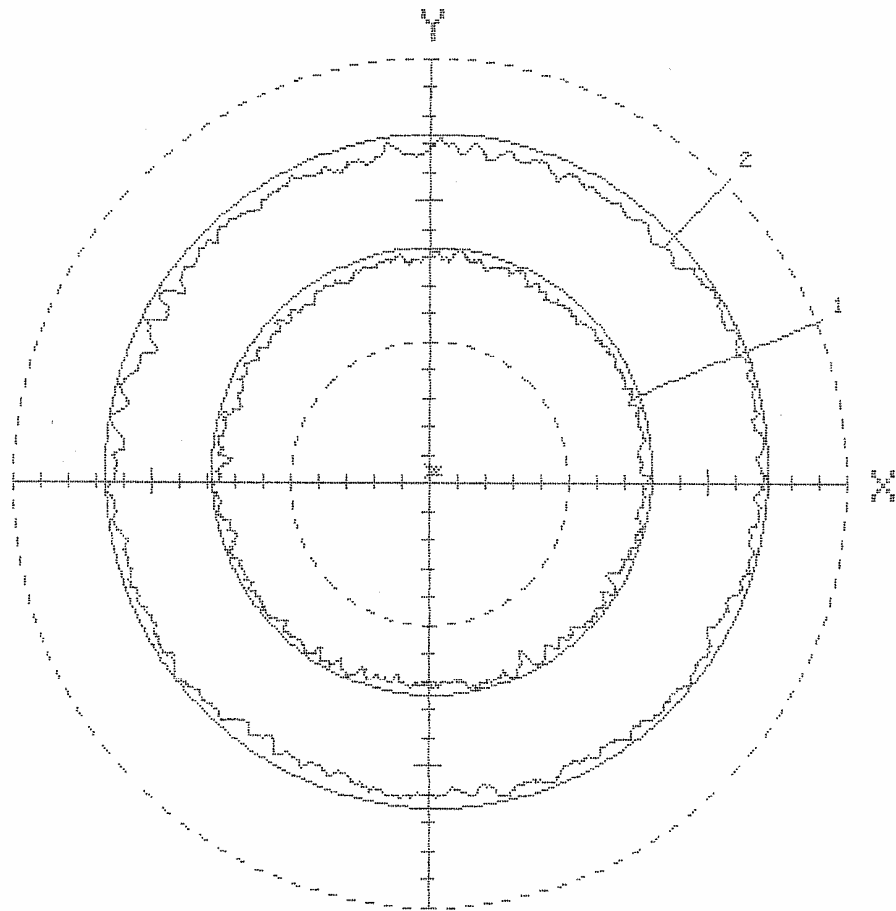
2. mereni

Misto mer.:		
Vyhodnoc.:	MCC	MCC
Filtr (i/o):	0-500	0-500
Dilek : ( $\mu\text{m}$ ):	1.00	1.00
Poloha (mm) :	68.3	81.3
X0 ( $\mu\text{m}$ ):	0.56	-0.49
Y0 ( $\mu\text{m}$ ):	0.25	-0.03
P+V ( $\mu\text{m}$ ):	0.36	0.39

JUPITER 500 - vůle 9  $\mu\text{m}$ , válcovitost 1,1  $\mu\text{m}$ ,  $Q_c = 101,2 \text{ cm}^3/\text{min}$

### FAG — MERENÍ TVARU

Datum: 18.5.2007  
List : 4  
Součást : Soupatko  
Zakazka: kus c.5  
Kontrol.: Smolik



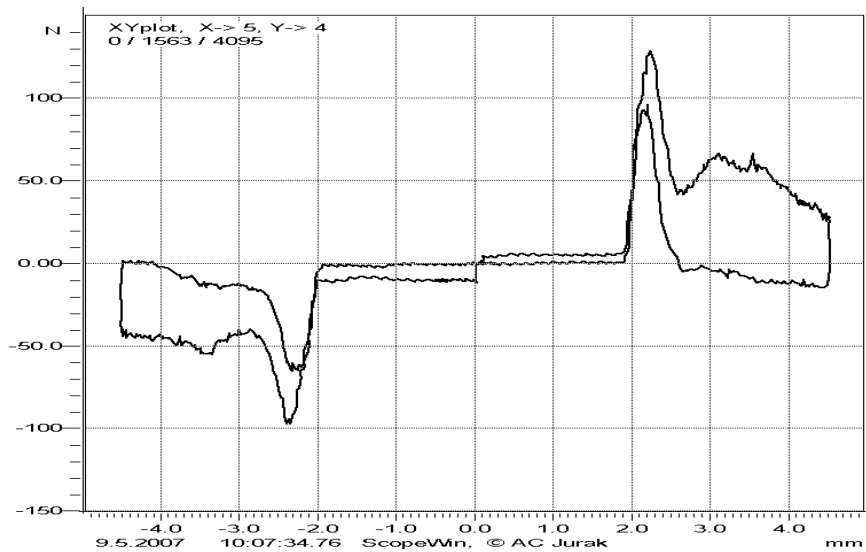
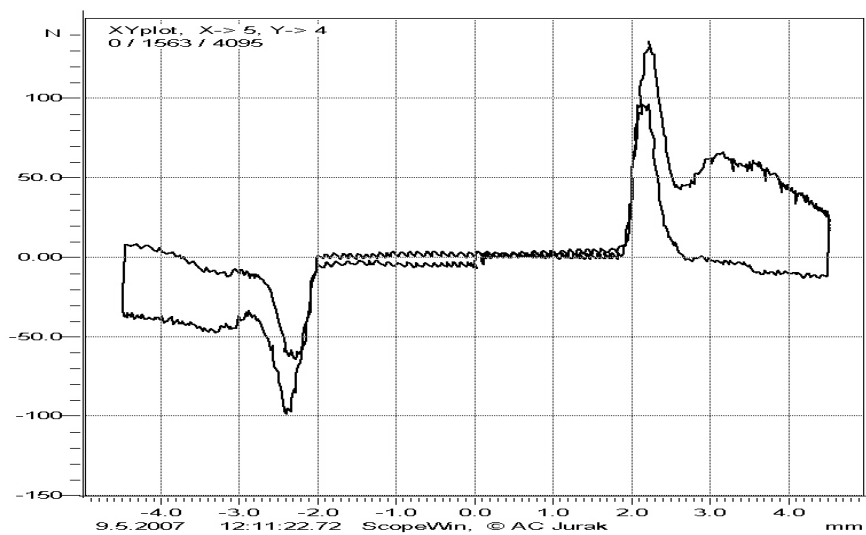
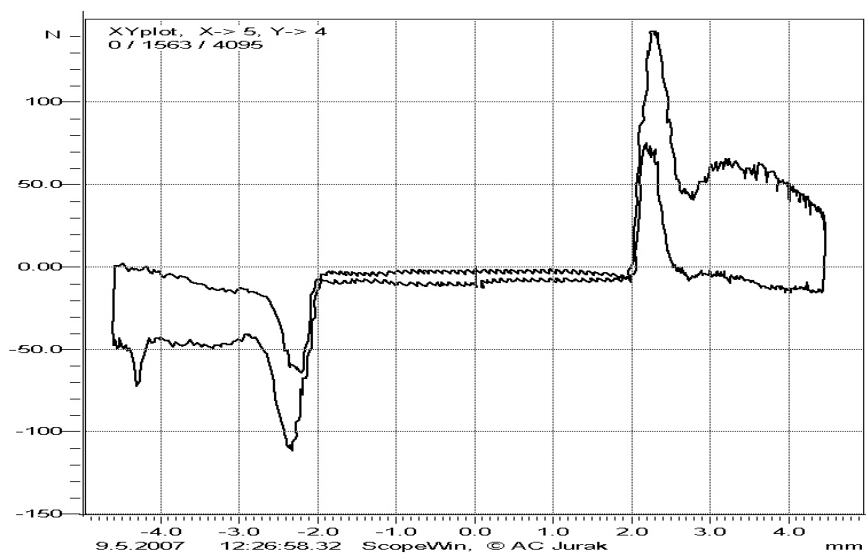
1. merení

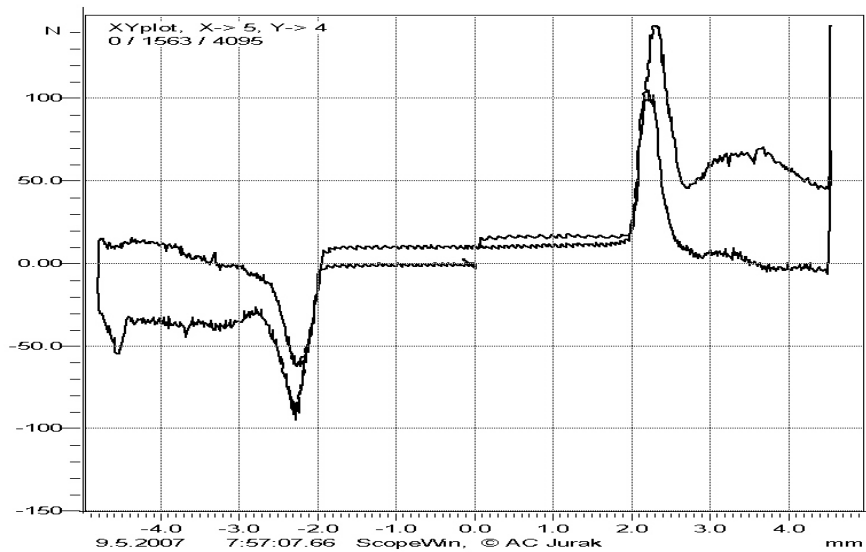
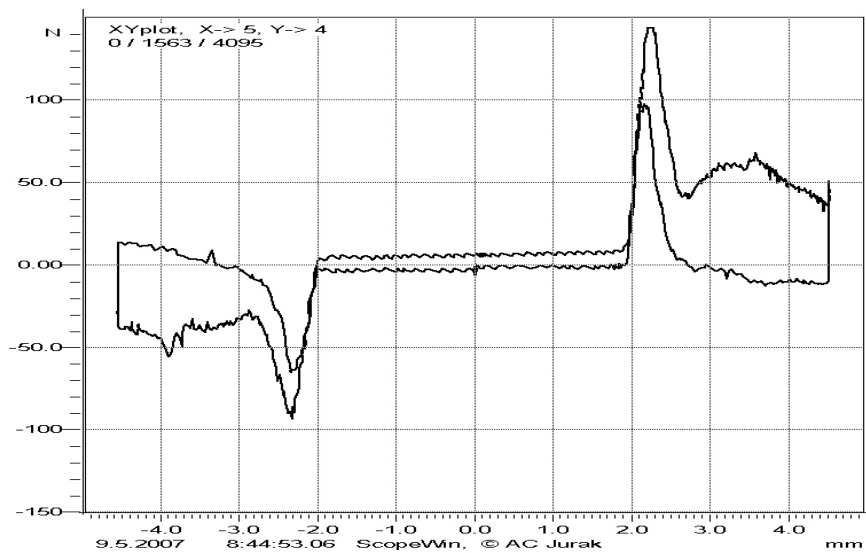
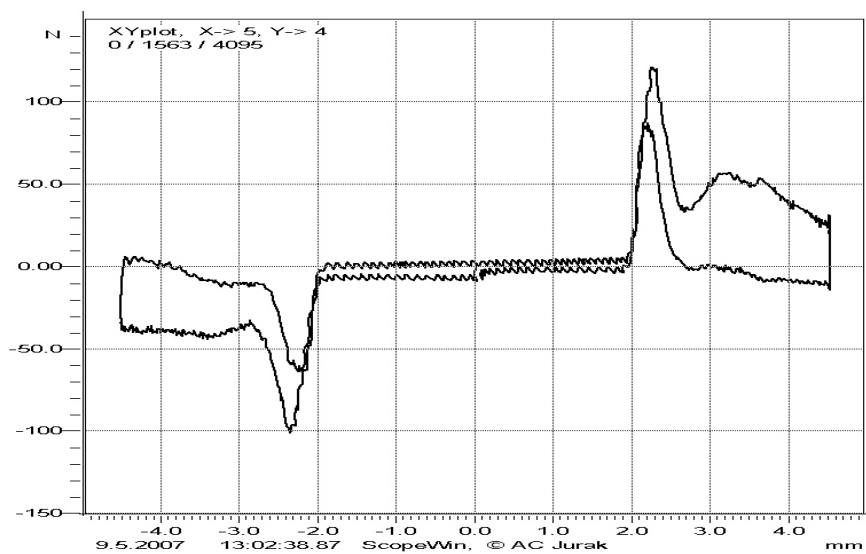
2. merení

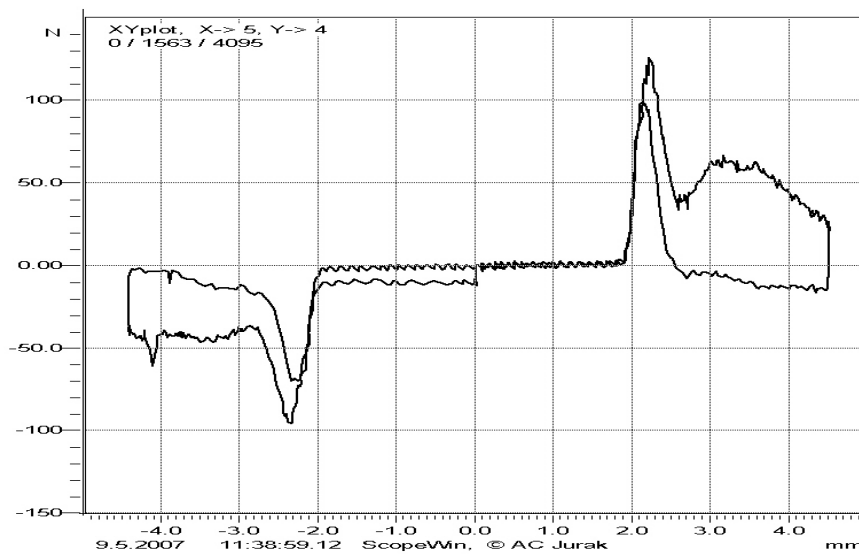
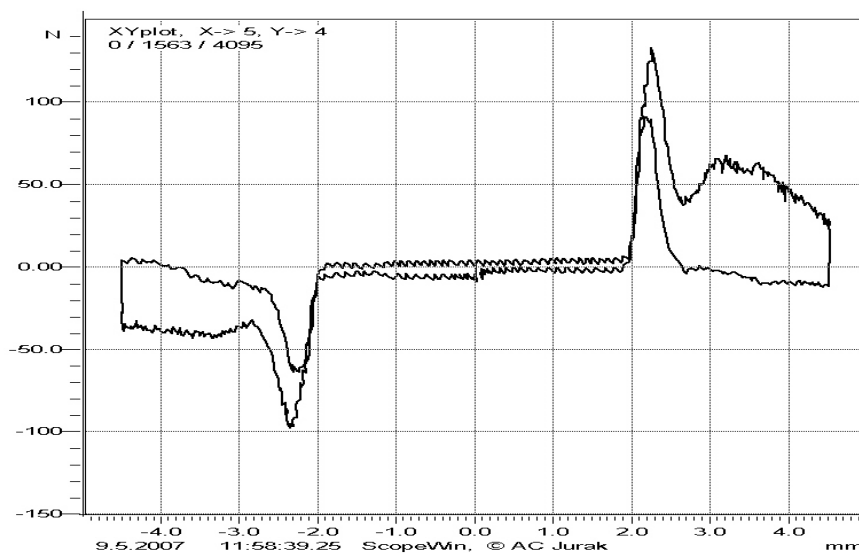
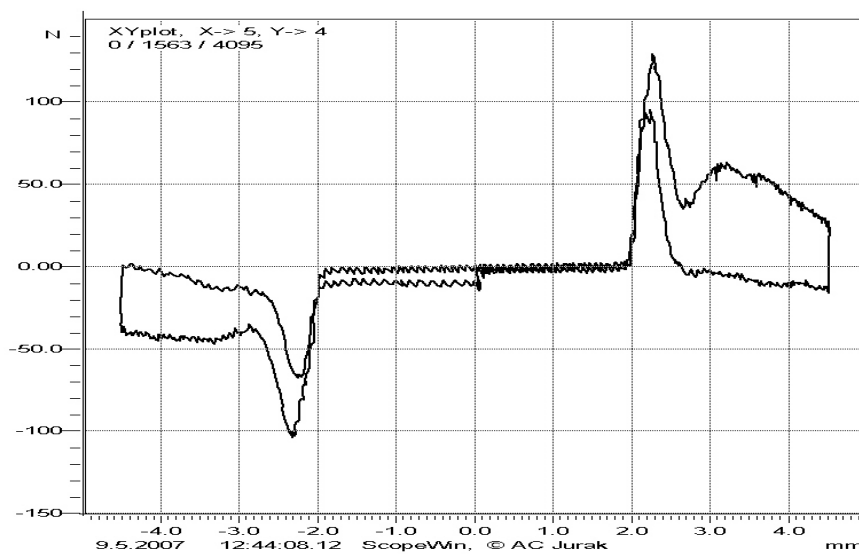
Místo mer.:		
Vyhodnoc.:	MCC	MCC
Filtr (i/o):	0-500	0-500
Dílek : ( $\mu\text{m}$ ):	1.00	1.00
Poloha (mm) :	68.2	81.2
X0 ( $\mu\text{m}$ ):	0.07	0.26
Y0 ( $\mu\text{m}$ ):	0.40	0.40
P+V ( $\mu\text{m}$ ):	0.84	0.95



**Příloha II. Grafy hydrodynamických sil pro jednotlivé technologie  
a jednotlivé vůle**

JUPITER 500 - vůle 6, 8, 9  $\mu\text{m}$ 

STUDER - vůle 6, 8, 9  $\mu\text{m}$ 

BUA 20 - vůle 7, 8, 9  $\mu\text{m}$ 

**Příloha III. Výkresová dokumentace tělesa a šoupátka rozváděče  
RPE4-10**

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 22.05.2007

Podpis: